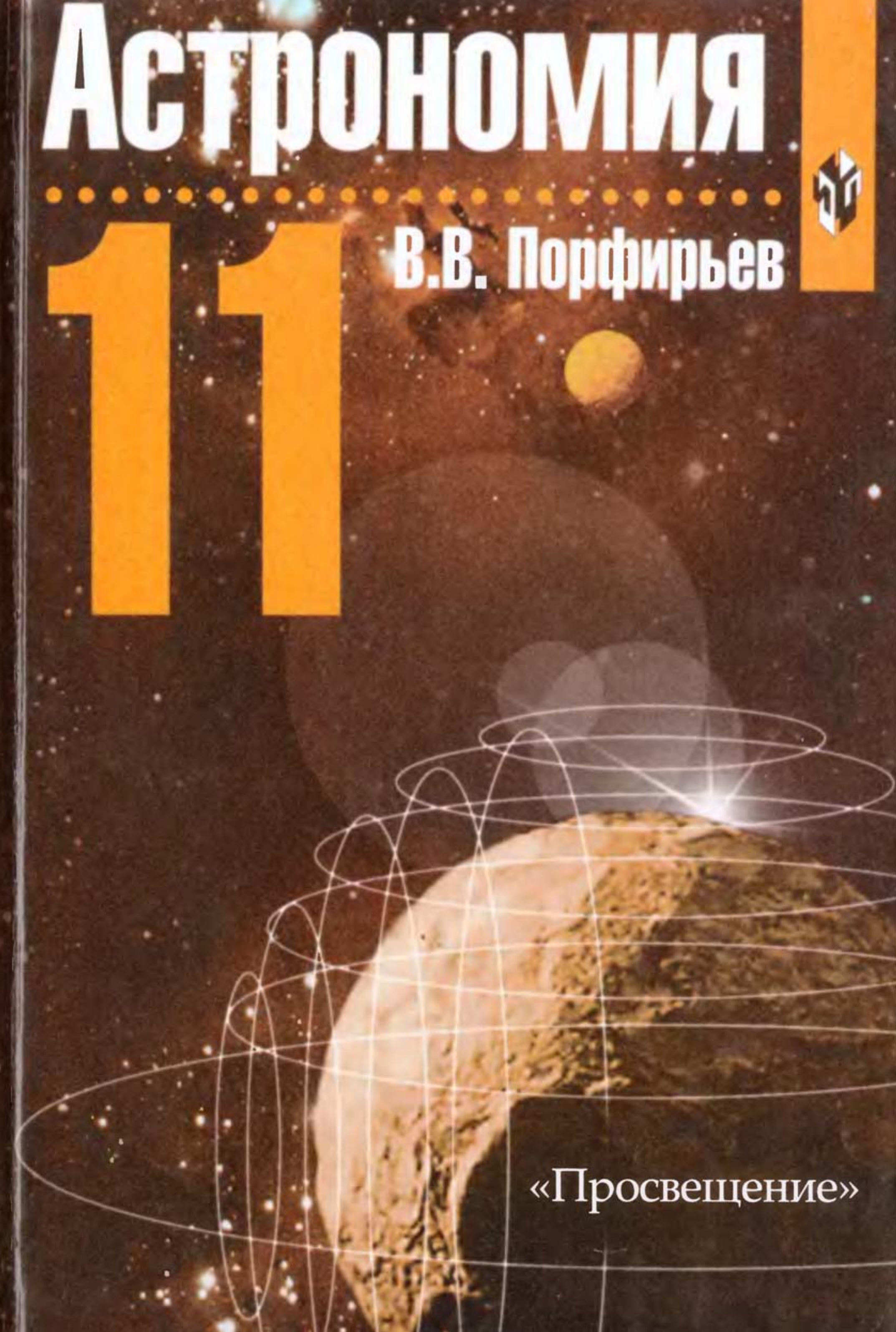
Астрономия

11

В.В. Порфирьев



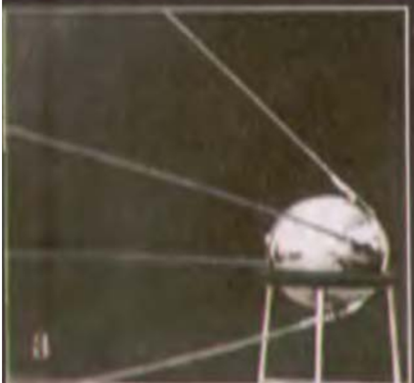
«Просвещение»

КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И СТАНЦИИ

1

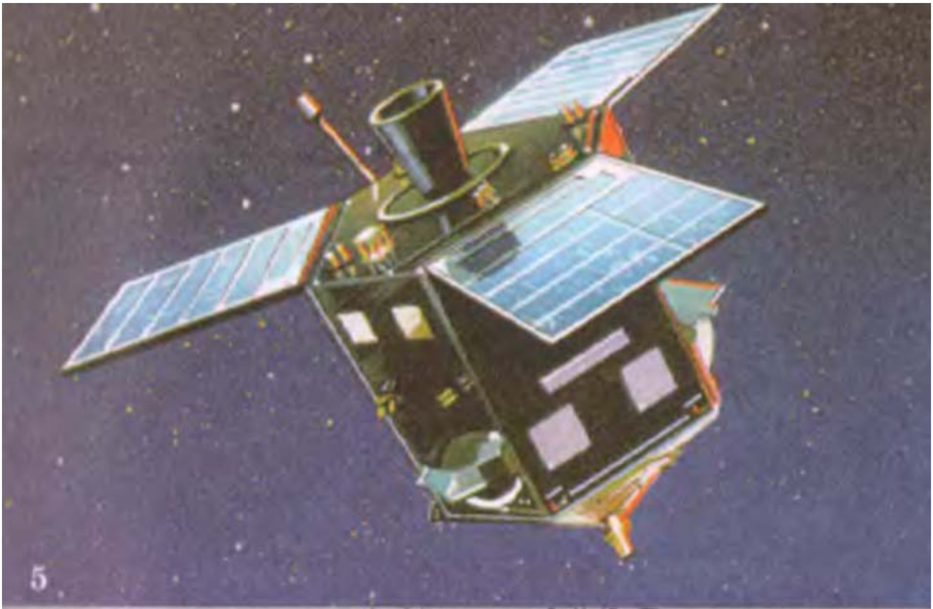
2

4



3

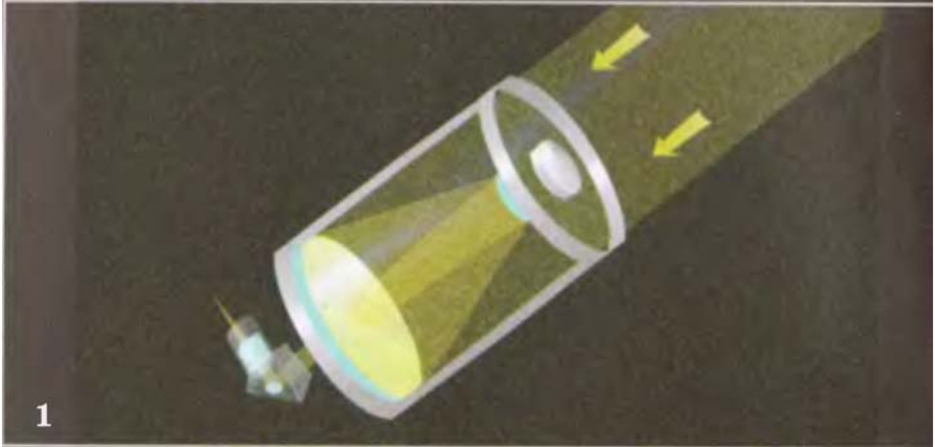
1. Международная орбитальная станция.
2. Первая высадка на Луну.
3. Первый искусственный спутник Земли.
4. Первый луноход.
5. Первый астрономический спутник "Hipparcos".
6. Первая орбитальная станция "Салют".



5

6

ТЕЛЕСКОПЫ



1. Устройство телескопа-рефлектора. 2. Современный телескоп-рефлектор. 3. Космический телескоп Хаббла. 4. Радиотелескоп с подвижным зеркалом. 5. РАТАН — 600.

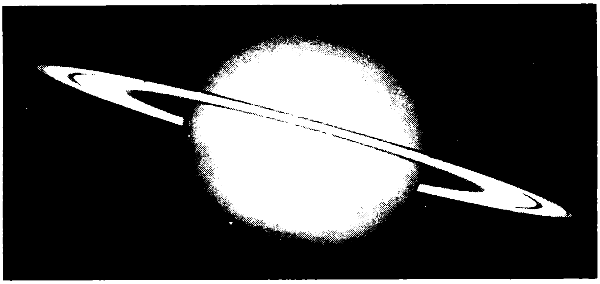
В.В. Порфирьев

Астрономия

Учебник для 11 класса общеобразовательных учреждений

Рекомендовано
Министерством образования
Российской Федерации

2-е издание,
переработанное и дополненное



Москва "Просвещение" 2003

УДК 373.167.1:52
ББК 22.6я72
П60

Порфирьев В. В.

П60 Астрономия : Учеб. для 11 кл. общеобразоват. учреждений / В. В. Порфирьев.— 2-е изд., перераб. и доп.— М. : Просвещение, 2003.— 174 с. : ил. — ISBN 5-09-011620-2.

В этом учебнике подробно, на доступном для учащихся уровне изложены достижения астрономической науки, современные теории происхождения галактик, звезд, Вселенной. Автор опирается на знания учащихся по физике, не использует в тексте сложных формул. Изучая астрономию по этому учебнику, учащиеся проявят большой интерес к физике и астрономии.

УДК 373.167.1:52
ББК 22.6я72

ISBN 5-09-011620-2

© Издательство «Просвещение», 2003
© Художественное оформление.
Издательство «Просвещение», 2003
Все права защищены

Глава I

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ АСТРОНОМИИ

1. Предмет астрономии. *Астрономия — наука о строении и развитии небесных тел, образуемых ими систем и Вселенной* («астрон» — звезда, «номос» — закон). Эта наука возникла в древности из практических потребностей человека: необходимости счета времени, предсказания сезонных явлений, определения положения и направления движения корабля в море или каравана в пустыне. Немалую роль играло и присущее человеку стремление познать окружающий мир, определить свое место в нем. Уже в самых древних письменных источниках мы находим хорошо развитую систему астрономических знаний.

Астрономия оказывала огромное влияние на развитие науки в прошлом и оказывает его сейчас. Большое практическое значение имела астрономия для географии, много нового принесли космические исследования планет для геологии. Современная физика не может обойтись без астрономических данных о строении Вселенной. Даже такая, казалось бы, далекая от повседневной жизни проблема, как проблема чужих цивилизаций, тоже имела практическое значение, хотя бы в шифровальном деле.

Астрономия — наука, основанная на наблюдениях. Простейшие из них — это наблюдения за звездным небом невооруженным глазом. В темную безлунную ночь нам представляется, что мы находимся в центре огромного плоского круга, накрытого полусферой, на которой расположены светящиеся точки — звезды. Продолжая наблюдения, мы замечаем, что полусфера поворачивается и все новые звезды появляются на востоке, в то время как другие исчезают на западе.

Образ сферы возникает потому, что человек не способен оценивать расстояние до предмета, превышающее 4—5 км. Все предметы, расположенные дальше, кажутся нам удаленными на это расстояние. Сфера, на которой, как нам кажется, расположены звезды, называется *небесной сферой* (более подробно о ней см. § 3).

На первый взгляд число звезд кажется бесконечно большим. В действительности же невооруженным глазом мы можем увидеть на всем небе около 6000 звезд, а одновременно не более 2000, так как половина небесной сферы закрыта Землей и у горизонта всегда существует дымка, скрывающая многочисленные слабые звезды.

2. Созвездия. Наименования звезд. Для проведения систематических наблюдений за звездным небом, а они необходимы, чтобы использовать звезды для ориентирования, нужно запомнить их относительное расположение. Для облегчения этой задачи уже в древности самые яркие и заметные звезды объединялись в созвездия. Первые созвездия получили наименования по названиям животных (Рак, Лев, Овен и др.), более поздние — по именам героев известных мифов (Персей, Андромеда, Геркулес и др.) или по названиям тех предметов, которые они напоминали (Лира, Стрела, Северная Корона и др.). На южном небе, т. е. на той части неба, которая не видна в средних широтах северного полушария, созвездия выделялись уже в период Великих географических открытий, что отразилось в их названиях (Микроскоп, Компас и др.).

Примерно в это же время (конец XVI — начало XVII в.) появились более точные карты неба. На этих картах созвездия изображались красивыми рисунками (рис. 1). Но небес-

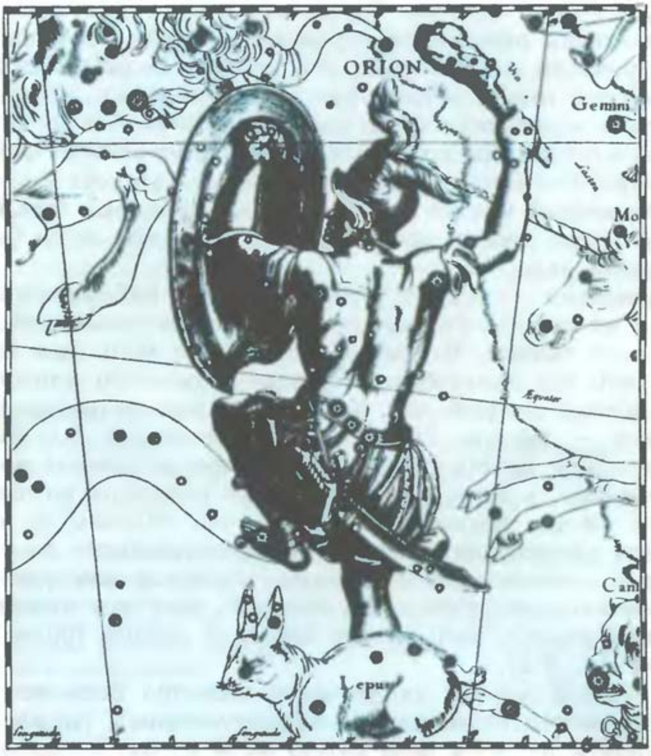


Рис. 1. Созвездие Ориона на старинной карте неба. Карта изображает небесную сферу так, как она видна снаружи.

ная сфера изображалась так, как мы видели бы ее снаружи. Это объяснялось тем, что еще со времен Древних Египта и Вавилона звездное небо изображалось в виде небесного глобуса. На современных картах неба созвездия показаны так, как мы видим их в действительности, т. е. так, как они видны из центра небесной сферы.

«Созвездиям давались имена и очертания как бы нарочно, с целью породить возможно большую путаницу и неудобства. Бесчисленные змеи извиваются длинными кольцами, удержать которые не в силах ни одна память, на всем пространстве небесного свода; медведи, львы и рыбы, большие и малые, безнадежно путают номенклатуру» (Д. Гершель. «Очерки астрономии»). Эти слова известного астронома наглядно характеризуют положение с небесной номенклатурой уже в XIX в.

До сравнительно недавнего времени в созвездия объединялись не все звезды и астрономы имели возможность (и пользовались ею) выделять все новые и новые созвездия. В результате этого число созвездий достигло 132. Полное отсутствие системы привело к тому, что каждый астроном признавал только свою систему созвездий. Создалась невероятная путаница.

Чтобы ее избежать, в 1922 г. Международный астрономический союз постановил оставить 88 созвездий с их традиционными названиями и принял решение называть созвездием область неба, ограниченную установленными границами. Все звезды в этих границах (а не только образующие фигуру созвездия), видимые как невооруженным глазом, так и в телескоп, считаются принадлежащими этому созвездию (рис. 2). Были подтверждены и уточнены и правила наименований звезд в созвездиях.

Некоторые звезды имеют собственные названия. Например, Сириус — α Большого Пса, Алголь — β Персея и т. д. Их немного, а общеупотребительных названий не более 10—15. Это самые яркие звезды созвездий (не всех). Звезды, чем либо замечательные (например, Алголь (от арабского «*эль гуль*» — дьявол) и Мира (от латинского *mirae* — удивительная) — эти звезды меняют свой блеск), обычно имеют собственные названия.

При создании карт и каталогов звезд потребовалось как-то обозначать их блеск (в просторечии говорят о яркости звезд, но это неправильно, поскольку яркость — физическая величина, никакого отношения к видимости звезд не имеющая). В действительности мы воспринимаем освещенность (E), т. е. количество энергии, которая приносится светом на единицу площади в единицу времени. Именно это воспринимается глазом и фиксируется приборами.

Великий древнегреческий астроном Гиппарх (II в. до н. э.), создатель первого каталога звезд, разделил все звезды на шесть величин. К первой величине он отнес 23 самых ярких звез-

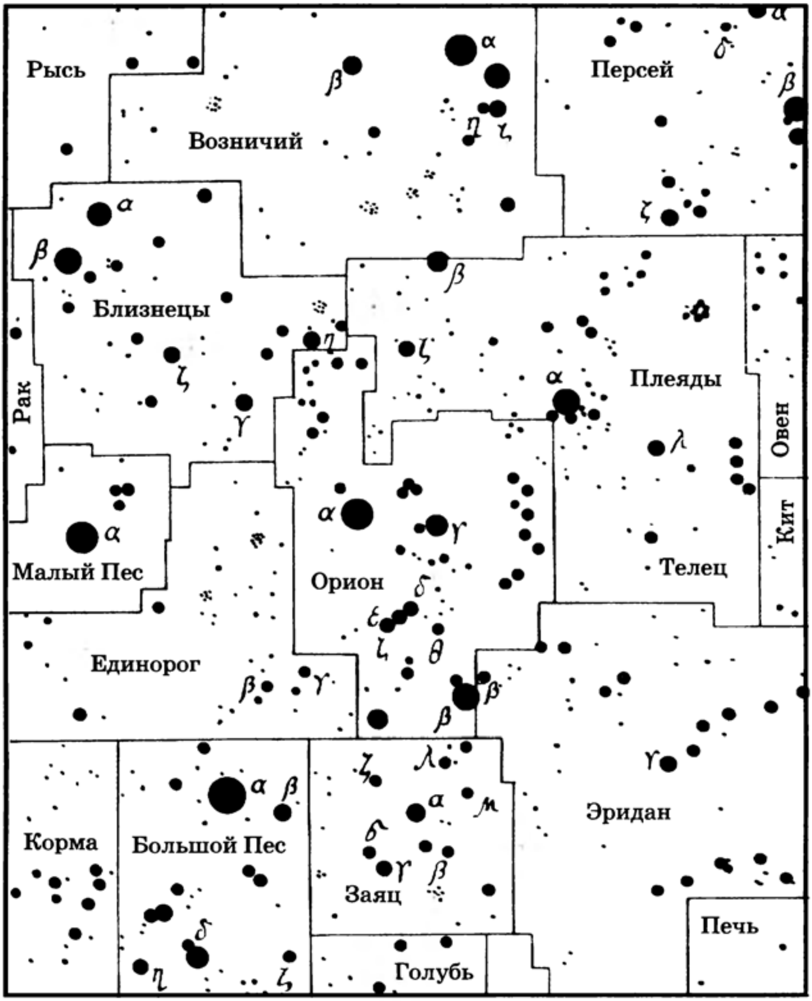

Рысь
Возничий
α
β
η
ζ
Персей
α
δ
β
ζ
Близнецы
α
β
ζ
γ
η
Рак
Плеяды
β
ζ
α
λ
Овен
Кит
Телец
Малый Пес
α
Орион
α
γ
δ
ε
ζ
θ
β
Единорог
β
γ
Эридан
γ
Корма
Большой Пес
α
β
δ
η
ζ
Заяц
ζ
λ
α
μ
δ
γ
β
Голубь
Печь

Рис. 2. Созвездие Ориона на современной карте неба. Карта изображает небесную сферу так, как она видна изнутри.

ды, а к шестой величине — звезды, едва различимые невооруженным глазом. Понятие звездной величины сохранилось до наших дней и часто употребляется в научной и популярной литературе. Оказалось, что изменение блеска на одну звездную величину соответствует изменению светового потока в 2,512 раза. Это значение несколько отличается от данного Гиппархом, но очень удобно, поскольку разность звездных величин можно записать в виде простого соотношения

$$m_1 - m_2 = -2{,}5\ \lg\frac{E_1}{E_2} \text{ или } E_1/E_2 = 10^{-0{,}4(m_1 - m_2)},$$

где m — обозначение звездной величины, которая обычно, как и в обозначении градуса, записывается в виде степени (например, 2^m обозначает вторую звездную величину).

Шкала звездных величин задается нульпунктом, т. е. указанием, что такая-то звезда имеет такую-то звездную величину. Принято, что звезда Вега (α Лиры — самая яркая звезда северного неба) имеет звездную величину, равную 0^m. Более яркие светила имеют отрицательную звездную величину. Значения звездных величин для некоторых объектов приведены в таблице 1. В нашем учебнике мы не будем пользоваться этим понятием.

Таблица 1

Звездные величины

Объект	Звездная величина	Относительный блеск
Солнце	-26^m	$2{,}5 \cdot 10^{10}$
Луна в полнолунии	-12^m	$6 \cdot 10^4$
Сириус	$-1{,}6^m$	4,4
Вега	0^m	1
Звезды Большой Медведицы	2^m	0,16
Самые слабые звезды, видимые невооруженным глазом	6^m	$4 \cdot 10^{-3}$
Звезды, доступные космическому телескопу Хаббла	30^m	10^{-12}

По традиции, введенной в 1603 г. немецким астрономом И. Байером, звезды в созвездии в порядке убывания видимой яркости обозначаются сначала греческими буквами (α, β, γ, ...), затем латинскими буквами (*a*, *b*, *c*, ...), потом цифрами с добавлением названий созвездий, например: α Большого Пса, β Лиры, γ Зайца, 61 Лебедя. Звезды, не видимые невооруженным глазом, принадлежащие к особым классам или обладающие какими-либо особыми свойствами, а также другие астрономические объекты обозначаются номером в каталоге (списке) этих объектов с указанием их названий (например, туманность Андромеды обозначается либо M31, либо NGC7456 соответственно в каталоге Месье и в Новом генеральном каталоге). Любое обозначение звезды (или другого астрономического объекта) — это всего лишь ее собственное название.

Отметим, что право давать названия как небесным объектам, так и объектам на небесных телах имеет только Комиссия по номенклатуре Международного астрономического союза. Другие названия не имеют никакого значения.

Наблюдая за небом, люди убедились, что взаимное расположение звезд не меняется (они так и стали называться — неподвижными звездами). Только пять светил, выделяющихся ровным светом (в то время как звезды мерцают) и большой яркостью, меняют свое расположение среди остальных. Эти светила были названы планетами (от лат. *planeta* — блуждающая). Если смотреть в мощный бинокль или небольшой телескоп (достаточно увеличение в 10—15 раз), то можно увидеть, что звезды по-прежнему видны в виде светящихся точек, а планеты — в виде небольших светящихся дисков. Венера и Меркурий иногда видны как серп, наподобие лунного. Уже при увеличении в 50 раз можно увидеть кольца Сатурна и полосы в атмосфере Юпитера. В древности к планетам причисляли Луну и Солнце. Луна и Солнце всегда перемещаются среди звезд с запада на восток. Остальные планеты то движутся в том же направлении (прямое движение), то останавливаются (стояние), то движутся в обратном направлении (обратное движение) (рис. 3).

3. Системы мира. Геоцентрическая система Птолемея. Коперниканский переворот в науке. Одной из основных задач астрономии всегда было создание системы мира, или, говоря современным языком, такой его модели, которая, соответствуя господствующим представлениям об окружающем мире и основным законам природы, позволяла бы описывать наблюдаемые явления и предсказывать важнейшие из них, т. е. позволяла бы судить о действительном устройстве мира.

Первая научная система мира начала формироваться в трудах Аристотеля, Гиппарха и других ученых Древней Греции. Свое завершение она получила в работах выдающегося древнегреческого астронома Птолемея (II в. н. э.). Эта система называется геоцентрической системой Птолемея (рис. 4) или птолемеевой системой мира.

Согласно этой системе в центре мира расположена Земля (от греч. — Гея, откуда и название «геоцентрическая»). Вселенная ограничена хрустальной сферой, на которой расположены звезды (сфера неподвижных звезд). Между Землей и сферой движутся планеты. Движения планет, Солнца и Луны описывались сложной системой круговых движений, которые в сумме давали наблюдаемые перемещения.

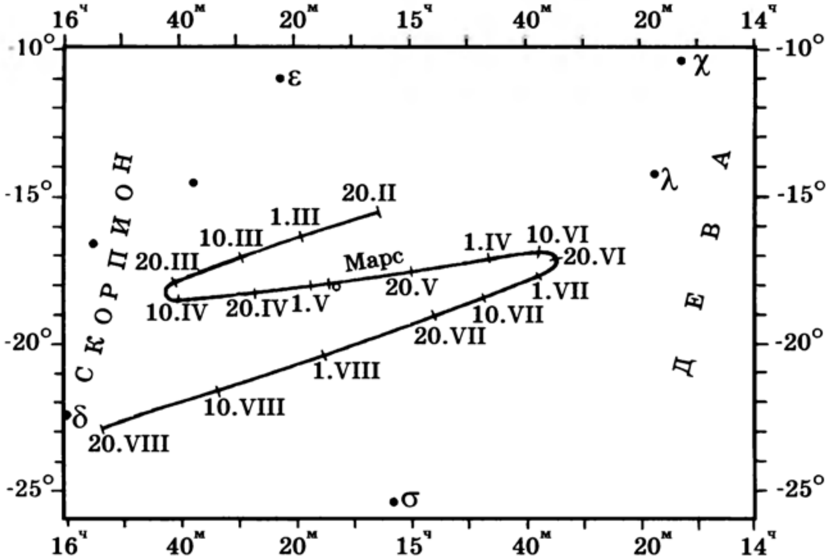


Рис. 3. Видимый путь Марса среди звезд на карте неба за 6 месяцев.

Уже в древности многие астрономы пытались построить гелиоцентрическую систему, поместив в центр мира Солнце. Но их попытки были отвергнуты.

На протяжении многих столетий средневековые астрономы вели тщательные наблюдения за движением планет, непрерывно совершенствуя и уточняя систему Птолемея. По необходимости вводились новые круги, смещались центры планетных орбит. Система мира все более и более усложнялась. Становилось ясным, что она ложна в своей основе. В 1543 г. вышла в свет книга гениального польского астронома Николая Коперника «Об обращении небесных сфер». В ней излагалась гелиоцентрическая система мира. Согласно этой системе в центре мира находится Солнце (от греч.— Гелиос, откуда и название «гелиоцентрическая»). Планеты, в том числе и Земля, обращаются вокруг Солнца по круговым орбитам, а Луна

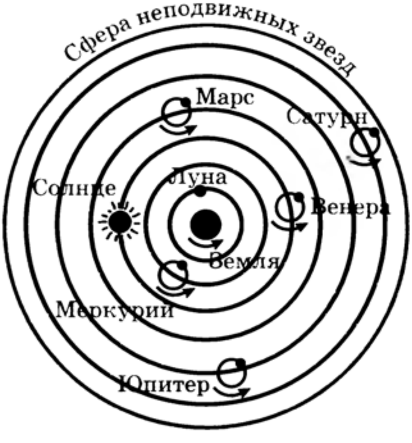


Рис. 4. Система мира Птолемея (геоцентрическая).

обращается вокруг Земли и одновременно с ней вокруг Солнца (рис. 5). Гелиоцентрическая система позволила освободиться (хотя и не полностью) от ряда произвольных и противоречивых допущений, которых требовала система Птолемея, и объяснить наблюдаемые факты с единой точки зрения. Фактически Коперник сформулировал новый принцип научного исследования, определивший на многие годы путь развития науки. Согласно этому принципу то, что мы видим, необязательно совпадает с тем, что происходит на самом деле. Новое учение впервые отвергло лежащее в основе любой религии представление о принципиальном отличии «земного» — низкого и порочного от «небесного» — чистого и возвышенного. Земля была сведена в ряд обычных планет, а человек потерял свой статус «центра мироздания». Произошел разрыв науки с теологией, открылся путь для материалистического познания природы. Важнейший шаг в направлении развития материалистического мировоззрения был сделан Джордано Бруно, сформулировавшим идею о бесконечности Вселенной, о тождественной природе Солнца и звезд, о множественности обитаемых миров.

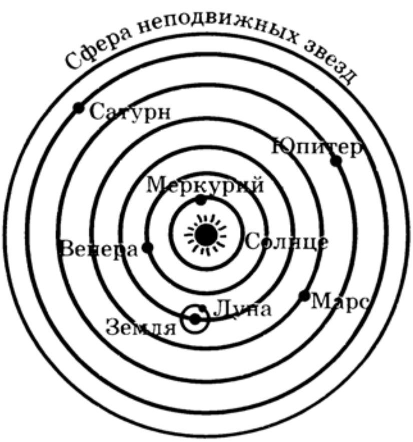


Рис. 5. Система мира Коперника (гелиоцентрическая).

4. Кеплер и его законы движения планет. Окончательная победа коперниканства связана с именами И. Кеплера и Г. Галилея. Выдающийся немецкий астроном и математик Иоганн Кеплер получил в наследство от датского астронома Тихо де Браге результаты многолетних наблюдений за движением планеты Марс. Обработав их, И. Кеплер сформулировал новые законы движения планет (они рассмотрены в § 8). Важнейшим выводом ученого было то, что планеты движутся по эллипсам и неравномерно. Это положение позволило окончательно отказаться от произвольных допущений, сохранившихся в теории Коперника от птолемеевой системы мира.

5. Галилей. Телескопические наблюдения. 7 января 1610 г. знаменитый итальянский ученый Галилео Галилей впервые направил на небо свой телескоп (рис. 6). Уже в первые ночи наблюдений Г. Галилей обнаружил, что существует огромное количество слабых, недоступных для невооруженного глаза звезд. Выяснилось, что Млечный Путь состоит из слабых звезд, угловые расстояния между которыми настолько малы, что их изображения на сетчатке глаза сливаются и образуют сплошную туманную полосу. Галилей установил, что в отличие от звезд планеты обладают видимыми в телескоп дисками, что Венера светит отраженным светом Солнца и, подобно Луне, меняет свой вид, представляясь то полным диском, то серпом. Галилей увидел горы на Луне и определил их высоту, а у Юпитера обнаружил четыре спутника (до сих пор называемые галилеевыми), которые обращаются вокруг него, подобно Луне, обращающейся вокруг Земли. Открытия Г. Галилея непосредственно подтвердили теорию Коперника.

Нужно сказать, что открытия Галилея были признаны не сразу. Часть ученых отнеслись к ним весьма скептически. Некоторые даже отказывались смотреть в телескоп, поскольку считали все увиденное Галилеем просто оптическими иллюзиями.

Но так продолжалось недолго. Господствующая католическая церковь резко осудила Галилея и заставила уже далеко не молодого ученого отречься от своих взглядов. Только недавно церковь признала осуждение Галилея трагической ошибкой.

6. Ньютон. Возникновение небесной механики. Огромное значение для дальнейшего развития астрономии имели открытия гениального английского ученого И. Ньютона. Используя сформулированные им законы движения (законы Ньютона), он показал, что законы Кеплера следуют из законов движения, если силы, действующие между телами, изменяются обратно пропорционально квадратам расстояний между ними, т. е. открыл закон всемирного тяготения. Пользуясь законами, открытыми Ньютоном и разработанными им же новыми математическими методами, ученые смогли создать теорию движения планет. Это привело к тому, что в астрономии выделились два раздела: астрометрия и небесная механика (подобно тому как в физике в свое время выделились механика, оптика, электродинамика и др.).

Астрометрией называется раздел астрономии, занимающийся определением точных положений и движений светил на небесной сфере, а также

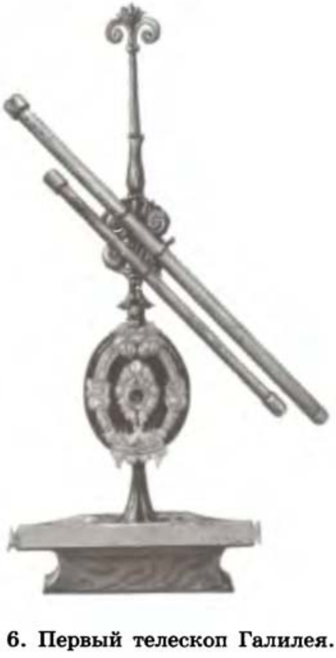


Рис. 6. Первый телескоп Галилея.

смежными вопросами: определением и хранением времени, определением координат на поверхности Земли, изучением вращения Земли, определением расстояний до небесных объектов и др.

Небесной механикой называется раздел астрономии, изучающий движение небесных тел под действием сил всемирного тяготения.

В XVII—XIX вв. развивались именно эти отрасли астрономии.

Открытия И. Ньютона изменили и уточнили систему мира. Если у Коперника по-прежнему границей мира служила сфера неподвижных звезд, то в ньютоновской системе мир бесконечен во времени и в пространстве. Время однородно и течет равномерно во всей Вселенной, пространство однородно (т. е. его точки не отличаются друг от друга), и любое направление в нем ничем не выделяется (конечно, в отсутствие материальных тел). Это означает, что центра мира просто не существует. Материальные тела (звезды, планеты и т. д.) существуют в пространстве и во времени, но никак на них не влияют. Эта картина мира была общепринятой и считалась вполне точной до середины XX в., когда ее сменила новая картина, основанная на общей теории относительности А. Эйнштейна. Это гораздо более сложная система (о ней будет идти речь в последней, VII главе учебника).

§ 2. СТАНОВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ АСТРОНОМИИ

1. Телескопы. Со времен Галилея основным прибором для получения информации о небесных светилах служит телескоп.

Современные телескопы мало похожи на первый телескоп Галилея и представляют собой сложнейшие технические конструкции. Но принцип их устройства остается прежним. С помощью линзы или параболического зеркала (см. оборот форзаца I) мы собираем свет от небесного объекта и строим изображение в фокусе линзы или зеркала. Здесь помещается приемник излучения, который фиксирует изображение для дальнейшего изучения.

Небесные светила мы изучаем, собирая, принимая, регистрируя и исследуя приходящее от звезд излучение. Глаз тоже является прибором, собирающим и регистрирующим падающий на него свет. Свет от звезды, проходящий через зрачок глаза, собирается хрусталиком на сетчатке. Энергия падающего света вызывает отклик нервных окончаний. В мозг поступает сигнал, и мы видим звезду. Но энергии, приходящей от звезды, может быть слишком мало (звезда слабая). Тогда сетчатка не прореагирует, и мы звезды не увидим.

Принципиально телескоп от глаза отличается только размерами, способом концентрации света и природой регистратора света. Важнейшими характеристиками телескопа являются его разрешающая и проницающая способности.

Разрешающая способность телескопа определяется наименьшим угловым расстоянием между светящимися точками, которые могут быть видны (разрешены) как отдельные объекты.

Проницающая способность телескопа определяется наименьшей регистрируемой освещенностью, создаваемой светящимся объектом.

Проницающая способность телескопа определяется прежде всего его диаметром: чем больше диаметр, тем больше света он собирает. Важную роль играют и приемники излучения. Если 200 лет назад в телескоп просто смотрели и пытались зарисовать то, что видят, а 40 лет назад в основном фотографировали созданное телескопом изображение, то теперь пользуются электронными приемниками изображения, которые могут регистрировать примерно 60% падающих на него фотонов (фотопластинка регистрирует примерно в 10—100 раз меньшую долю).

Разрешающая способность телескопа тоже определяется его размерами. Дифракция световых лучей на краю отверстия приводит к тому, что невозможно в телескопе различить две светящиеся точки, если направления на них образуют угол меньше предельного. Предельный же угол для идеального объектива и видимого света определяется по формуле

$$\alpha = \frac{14''}{D},$$

где α — предельный угол, выраженный в угловых секундах; D — диаметр телескопа (в см). Для человеческого глаза предельный угол равен 28″ (фактически 1—1,5′), для крупнейшего в мире телескопа диаметром 10 м предельный угол равен 0,015″. Реально предельный угол в несколько раз больше из-за влияния атмосферы.

Однако сейчас наступает новый этап в создании наземных телескопов, которые можно с полным основанием назвать приборами XXI в. (см. оборот форзаца I). Во-первых, они очень большие — диаметр их главного зеркала 8—10 м. Во-вторых, они построены с использованием новых принципов. Их зеркала подстраиваются под изменения, происходящие в атмосфере, так что расфокусировка изображения, вызванная перепадами плотности воздуха и его потоками, сводится к минимуму. Такая оптика, «умеющая» приспосабливаться к быстроменяющимся условиям, называется адаптивной. Для повышения разрешающей способности телескопов применяются также методы оптической интерферометрии с большой базой.

К новому поколению телескопов относятся 10-метровые телескопы Кека (США), 10-метровый телескоп Хобби-Эберли и 8-метровые телескопы Джемини, Субару, телескоп VLT (*Very Large Telescope* — Очень Большой Телескоп) Европейской южной обсерватории, а также находящийся в стадии постройки Большой Бинокулярный Телескоп (*Large Binocular Telescope*) в Аризоне (США).

Очень важно то обстоятельство, что во всех этих телескопах главное зеркало образовано отдельными зеркалами, число которых различно в разных телескопах. Так, в телескопе Субару смонтировано 261 зеркало, в VLT — 150 осевых и 64 боковых зеркала, в телескопе Джемини — 128 зеркал. В Большом Бинокулярном Телескопе (LBT) имеется два главных зеркала, состоящие также из многих элементов. Диаметр главных зеркал всех этих телескопов лежит в диапазоне от 8,1 до 8,4 м. Зеркала управляемы, у каждого имеется система приспособлений, которые могут, давя на зеркало, нужным образом изменять его форму, что стало возможным, когда начали изготовлять очень тонкие и легкие зеркала.

Для чего это делается? С помощью телескопа необходимо получать как можно более ясное изображение удаленной звезды, которое должно выглядеть одной точкой. Большие объекты, вроде галактик, могут рассматриваться как множество точек. Свет от далекой звезды распространяется в виде сферической волны, проходящей огромное расстояние в космическом пространстве. Фронт волны, достигшей Земли, можно считать плоским из-за гигантского радиуса сферы — расстояния до звезды.

Если на телескоп падает плоская волна, то в фокальной плоскости появляется точка, размер которой определяется только дифракцией света, т. е. выполняется условие предельного угла. Именно это имеет место в космическом телескопе Хаббла, который, несмотря на то что его диаметр всего 2,4 м, получает изображение лучше, чем 4—6-метровые телескопы старой конструкции.

Прежде чем попасть в телескоп, волна проходит через земную атмосферу и турбулентность воздуха, что нарушает плоскую форму фронта. Изображение искажается. Адаптивная оптика призвана скомпенсировать отклонения и восстановить изначальную (плоскую) форму волнового фронта.

Таким образом, телескоп дает исследователю совершенно новые возможности по сравнению с наблюдениями невооруженным глазом: регистрировать значительно более слабые источники и видеть больше мелких деталей на небесных объектах.

Не нужно думать, что все проблемы с адаптивной оптикой легко и просто решаются. Только появление лазеров, высотных ракет, сверхмощных и сверхбыстродействующих ЭВМ позволило решать многие проблемы и получать на наземных телескопах изображения не хуже тех, которые получены за пределами земной атмосферы.

2. Открытие новых астрономических объектов. Применение телескопов все больших и больших размеров привело к обнаружению множества совершенно неожиданных астрономических объектов. Уже в XVIII в. В. Гершелем было установлено существование двойных и кратных звезд, т. е. систем, в которых две или больше звезд движутся под действием сил всемирного тяготения вокруг общего центра масс. Изучение этих систем позволяет определить массы звезд (см. § 24).

Очень важным было обнаружение объектов явно не звездного происхождения. Это так называемые туманности — объекты, похожие на клочки светящегося тумана (см. § 29). Среди них В. Гершель обнаружил два четко выраженных типа. Туманности первого типа не обладают выраженной упорядоченной структурой. Встречаются они в пределах полосы Млечного Пути (от греч.— Галактика) и были названы галактическими (теперь газовыми или диффузными). Туманности второго типа обладают четко выраженной структурой, чаще в виде спиралей (см. форзац II). Они встречаются вне Млечного Пути и были названы внегалактическими.

Тогда же В. Гершель установил, что Млечный Путь представляет собой огромную изолированную звездную систему, названную Галактикой (с большой буквы). Как и предполагал Гершель, галактические туманности оказались объектами Галактики. Он же предположил, что внегалактические туманности тоже «звездные острова», т. е. они представляют собой такие же звездные системы, как и наша Галактика. Однако только в XX в. это было установлено окончательно. Их стали называть галактиками (с маленькой буквы).

В 1781 г. В. Гершель открыл еще одну планету Солнечной системы — Уран. В самом начале XIX в. были открыты астероиды, или малые планеты,— крошечные небесные тела, движущиеся между орбитами Марса и Юпитера, а в 1846 г. и 1930 г. были открыты на основании теоретических расчетов Нептун и Плутон — еще две планеты Солнечной системы (подробнее см. § 9).

3. Определение расстояний в Солнечной системе. Определение расстояний до небесных тел чрезвычайно важно, так как, только зная расстояния, можно ставить вопрос о природе небесных тел, определять размеры Солнечной системы, Галактики и самой Вселенной. Измерить расстояния до астрономических объектов можно только тригонометрическими методами, поскольку провести прямое измерение, естественно, невозможно.

В пределах Солнечной системы теория Коперника, уточненная Кеплером, дает возможность из наблюдений за движением планет определить относительные размеры их орбит. Обра-

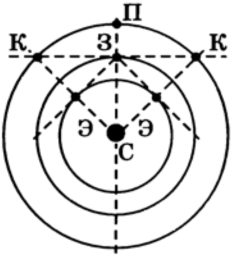


Рис. 7. Планетные конфигурации.

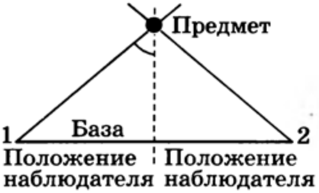


Рис. 8. Определение параллакса.

тимся к рисунку 7. На нем показаны три орбиты планет: средняя орбита Земли (ее положение на орбите отмечено буквой *З*), орбита одной из внешних планет, расположенной дальше от Солнца (например, Марса), орбита внутренней планеты (Венеры или Меркурия). Центральное тело — Солнце. Отмеченные положения планеты (эти положения называются планетными конфигурациями) на орбите называются: для внешней планеты *П* — противостояние, *К* — квадратура; для внутренней *Э* — элонгация. В зависимости от того, в какой стороне неба наблюдаются планеты, их квадратура и элонгация называются западной (планета видна западнее Солнца) или восточной. Очевидно, что нетрудно определить из наблюдений дуги *ПК* или углы *ЭЗС*. Их синусы равны отношениям радиусов соответствующих орбит. Остается определить расстояния *ЗК* и *ЗЭ*.

Определить расстояние до недоступного предмета можно, измерив угол, который называется параллаксом, между направлениями на предмет из двух точек (рис. 8). Если известно расстояние между точками (база), то задача сводится к простой геометрической. Остается выбрать базу и измерить углы.

Для определения расстояний в Солнечной системе базой служит радиус Земли — величина достаточно хорошо определенная. Угол, под которым он виден с планеты или другого тела, входящего в Солнечную систему, называется горизонтальным параллаксом. Расстояния определяются для тех планет, которые наиболее близко подходят к Земле. Это Венера и малая планета Эрос.

Два раза за столетие Венера проходит между Землей и Солнцем так, что ее диск проецируется на диск Солнца (рис. 9). Ближайшее такое прохождение произойдет 8 июня 2004 г. около 9 ч 10—20 мин по московскому времени. Продолжаться оно будет около 6 ч (для каждого места наблюдения время начала и конца прохождения немного отличается). Наблюдать прохождение нужно на экране, на который проецируется изображение Солнца. Планета будет видна как небольшой темный кружок, движущийся на фоне диска Солнца. Если

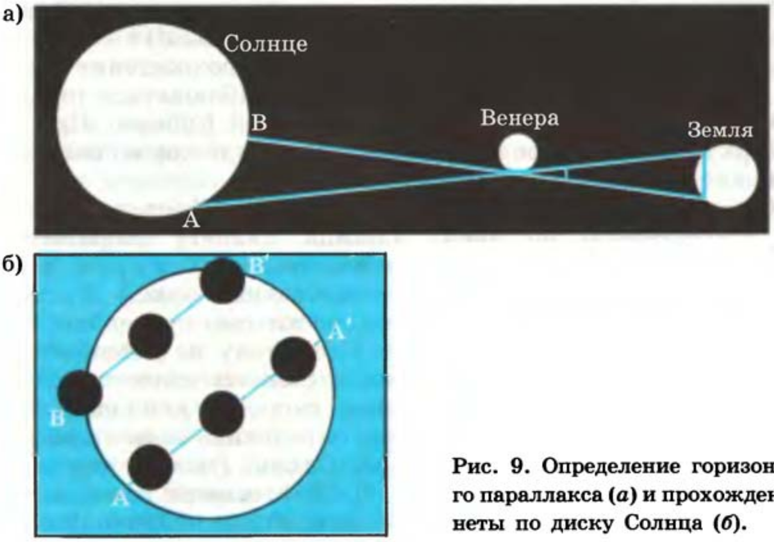

а)
Солнце
B
Венера
Земля
A
б)
B′
A′
B
A

Рис. 9. Определение горизонтального параллакса (*а*) и прохождение планеты по диску Солнца (*б*).

диаметр проекции солнечного диска 10 см (что доступно школьному телескопу), то диаметр проекции Венеры 3 мм. Невооруженным глазом (защищенным плотным фильтром) ее смогут увидеть только люди с очень острым зрением. Очень интересно наблюдать момент, когда планета пересекает край диска Солнца. Именно в такой момент, в 1761 г., М. В. Ломоносов заметил, что диск Венеры, частично уже пересекший край диска, был окружен сиянием (рис. 10). Он совершенно правильно заключил, что это результат преломления света Солнца в верхних слоях атмосферы Венеры. Интересно, сколь-

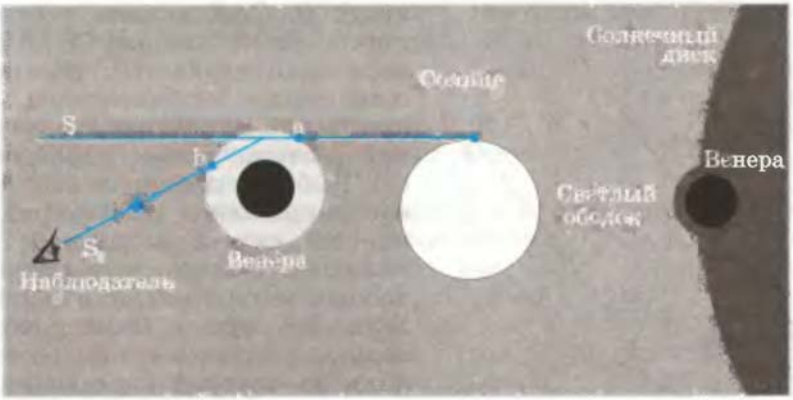

Солнечный диск
Солнце
S
a
b
Венера
Светлый ободок
S₁
Венера
Наблюдатель

Рис. 10. Схема наблюдения М. В. Ломоносова (прохождение Венеры по диску Солнца).

ко наблюдателей смогут увидеть такой эффект через 300 лет после Ломоносова. (Ломоносов был единственным!)

8 ноября 2006 г. можно будет увидеть прохождение Меркурия по диску Солнца. Это явление будет наблюдаться только с территории Дальнего Востока и Восточной Сибири. Проекцию Меркурия на экране можно увидеть в виде кружочка диаметром около 0,5 мм.

Наблюдатели, расположенные в разных местах Земли, видят проходящую по диску Солнца планету по-разному (см. рис. 9, I). Соответственно различаются и пути кружка по проекции Солнца (см. рис. 9, II), расстояние между путями сильно преувеличено, в действительности оно составляет на нашем экране только около 2 мм. Поскольку из наблюдений за движением Венеры и Меркурия мы знаем относительные размеры их орбит и орбиты Земли и скорости движения Венеры и Меркурия, то нам достаточно определить момент вступления Венеры или Меркурия на диск Солнца (момент прохождения точки A или B на рисунке 9, II) и момент схода с него (момент прохождения точки A' или B' на рисунке 9, II). С этими данными нетрудно вычислить расстояние между Землей и Венерой и расстояние до Солнца.

4. Определение расстояний до звезд. В принципе тот же метод применяется и для определения расстояний до звезд. Но они настолько далеки, что заметить отличие направлений на звезду из разных точек поверхности Земли совершенно невозможно. Нужно максимально увеличить расстояние между точками, в которых производится измерение.

Рассмотрим рисунок 11, на котором показано движение Земли вокруг Солнца, где точка C — Солнце; S — звезда; A и B — точки, в которых производится измерение. Они выбираются так, чтобы точки A, B, C, S лежали в одной плоскости и линия CS была перпендикулярна AB. (Все это совершенно необязательно, но при выполнении данных условий расчеты сильно упрощаются). Выберем некоторое постоянное направление AP (направление BP' ему параллельно.) Это может быть направление, параллельное земной оси, или направление на гораздо более слабую звезду, соседнюю с той, расстояние до которой определяется. Вероятно, что такая звезда расположена намного дальше и ее смещением можно пренебрегать.

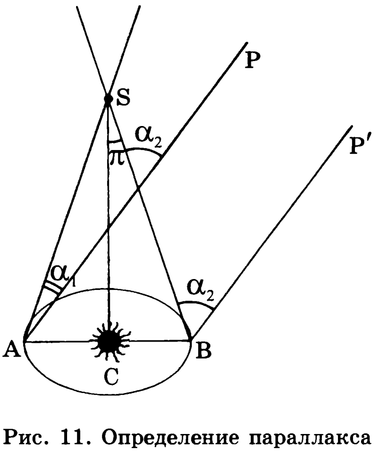


Рис. 11. Определение параллакса звезды.

Измеряются углы α_1 и α_2. Легко видеть, что угол CSB, обозначаемый π'' и называемый годичным параллаксом, равен:

$$\pi''=\frac{a_2-a_1}{2}.$$

Зная же π'' и расстояние CA (расстояние от Земли до Солнца), нетрудно определить и расстояние до звезды. Чтобы избежать ошибки, в качестве реперов используется несколько слабых звезд. Измерения производятся одновременно для всех таких звезд.

В 30-х гг. XIX в. почти одновременно В. Я. Струве в Пулково, Т. Гендерсон на мысе Доброй Надежды и Ф. Бессель в Кенигсберге определили параллаксы Веги, α Центавра и 62 Лебедя.

Оказалось, что ближайшая к нам звезда α Центавра имеет параллакс 0,76″, т. е. расположена от Солнца в 270 000 раз дальше, чем Земля.

Определение параллаксов звезд очень сложная и трудоемкая задача. Нужно сфотографировать или другим способом зафиксировать положения множества звезд. Причем это необходимо сделать, как минимум, трижды с интервалом между снимками в полгода. Затем сравнивают положения звезд относительно соседних существенно более слабых, предполагая, что они находятся достаточно далеко. Таким образом определяют одновременно параллактическое смещение и смещение звезды из-за ее движения в пространстве. Это очень сложная задача, требующая исключительно высокого разрешения, труднодостижимого в земных условиях.

До сравнительно недавнего времени было измерено всего около 1500 параллаксов, т. е. расстояний до различных звезд. Это очень мало, поскольку такие измерения лежат в основе косвенных методов определения расстояний во Вселенной. Положение изменилось после полета искусственного спутника HIPPARCOS. За несколько лет работы на спутнике было создано два каталога (списка) звезд. В одном содержатся данные о параллаксах и движении 118 000 звезд, причем параллаксы определены с точностью до 0,001″. В другом — данные о 1 000 000 звезд, но уже с меньшей точностью: от $7 \cdot 10^{-3}$ до $25 \cdot 10^{-3}$ секунды дуги.

5. Единицы длины, применяемые в астрономии. Поскольку расстояния между астрономическими объектами очень велики, пользоваться обычными единицами длины (метр, километр) неудобно. Поэтому в астрономии принята своя система единиц длины. Так, для измерения расстояний в пределах Солнечной системы используется астрономическая единица (а. е.), равная среднему расстоянию от Земли до Солнца (149 600 000 км). В таких единицах среднее расстояние наиболее удаленной планеты выражается числом 39,5 а. е. Однако и эта единица слишком мала для измерения расстояний между звездами в Галактике, а тем более расстояний между галактиками. Поэтому используется единица длины, название которой — парсек (пк); оно составлено из слов «параллакс» и «секунда», т. е. парсек — это расстояние, с которого средний радиус земной орбиты виден под углом 1″. Иначе парсек — это расстояние, для которого годичный параллакс равен 1″. Часто применяются и производные единицы: килопарсек (1 кпк=1000 пк) и мегапарсек (1 Мпк=1 000 000 пк). Реже применяется другая единица длины — световой год; это расстояние, которое свет проходит за один год. Между единицами длины, применяемыми в астрономии, существуют соотношения:

$$1 \text{ пк} = 3{,}36 \text{ св. года} = 206\ 265^{*} \text{ а. е.} = 3 \cdot 10^{16} \text{ м},$$
$$1 \text{ св. год} = 0{,}3066 \text{ пк} = 63\ 240 \text{ а. е.} = 9{,}5 \cdot 10^{15} \text{ м}.$$

В этих единицах диаметр Галактики равен 25 кпк, расстояние до ближайшей к нам галактики — туманности Андромеды — около 1 Мпк, расстояние до наиболее удаленных из известных нам объектов около $15 \cdot 10^9$ световых лет.

Непосредственно измерить параллакс можно только у сравнительно близких звезд, расположенных не далее 50—100 пк. К настоящему времени число измеренных параллаксов составляет более 100 000. Большинство из них получено на астрометрическом спутнике HIPPARCOS. Предполагается, что к 2007 г. будет запущен еще один астрономический спутник, который измерит более миллиона параллаксов, причем точность будет такова, что станут известны истинные параллаксы объектов, расположенных на расстоянии 1 кпк и далее. Это чрезвычайно важно, так как большие расстояния измеряются только косвенными методами, путем сравнения яркости более близких (параллаксы известны) и более далеких, родственных объектов).

6. Развитие небесной механики. Появление небесной механики обязано гению И. Ньютона, открывшего закон всемирного тяготения. С этого момента стало возможным точно рассчитывать движение небесных тел.

Небесная механика изучает движение небесных тел, космических аппаратов, искусственных и естественных спутников планет под действием сил гравитации. Задачей небесной механики является предсказание положений небесных тел, исследование устойчивости Солнечной системы и звездных систем, определение значений астрономических постоянных, построение теории движения тел Солнечной системы с учетом эффектов общей теории относительности. В ряде случаев учитывается давление света (в движении комет и астероидов), силы сопротивления среды (в движении ИСЗ), изменение массы и другие факторы. Для особо точных расчетов длительных космических полетов и движения астероидов учитываются поправки за счет современной теории пространства-времени-тяготения — общей теории относительности.

---

*206 265 — число секунд в радиане.

Первый значительный успех небесной механики был связан с кометами. Кометы — «хвостатые звезды», названные так за необычный вид (см. вклейку V). Они внезапно появляются на небе, быстро проносятся среди звезд и исчезают. В 1705 г. Э. Галлей предположил, что три кометы, наблюдавшиеся в 1531, 1607 и 1682 гг., являются одним и тем же небесным телом, двигающимся по эллиптической орбите с периодом около 76 лет, и предсказал новое появление кометы в 1858 г. Орбиту кометы уточнил А. Клеро, и она появилась в назначенное время. Эта комета получила название кометы Галлея. Последний раз она появилась в 1986 г.

К 40-м гг. XIX в. стало ясно, что движение открытого Гершелем Урана нельзя объяснить притяжением Солнца и известных к тому времени планет. Была выдвинута гипотеза о существовании еще одной планеты Солнечной системы.

Эта планета Нептун была открыта 23 сентября 1946 г. немецким астрономом И. Галле по вычислениям У. Леверье. Открытие Нептуна окончательно доказало правильность ньютоновской теории тяготения.

Величайшим триумфом небесной механики ознаменовались полеты космических советских станций «Вега-1» и «Вега-2» к комете Галлея в 1975—1976 гг. и американских «Вояджер-1» и «Вояджер-2» к Юпитеру, Сатурну, Урану и Нептуну в 1977—1989 гг. Эти полеты продолжаются и в настоящее время.

7. Возникновение и становление астрофизики. До середины XIX в. природа звезд и туманностей была предметом весьма абстрактных умозрительных рассуждений. Что в действительности происходит на них, почему и как они светят — такие вопросы нельзя было даже ставить. Положение прекрасно характеризовалось известным изречением древнего философа: «Если хочешь заниматься астрономией, не спрашивай, что такое звезды!» Положение стало меняться в 30-х гг. XIX в., когда были определены первые расстояния до звезд.

Определение расстояний до звезд позволило сразу же определить их массы (используя законы Кеплера, см. § 8), по крайней мере для нескольких близких двойных звезд. Оказалось, что массы звезд сравнимы с массой Солнца, тем самым подтвердилось предположение о том, что звезды — это далекие солнца.

Еще И. Ньютон, направив на призму луч света, обнаружил, что белый свет разлагается на семь цветных лучей, образующих радужную полоску — спектр. Через 150 лет Й. Фраунгофер установил, что спектр Солнца пересечен тонкими темными линиями — линиями поглощения, или фраунгоферовыми линиями, а в 1858 г. Р. Бунзен и Г. Кирхгоф доказали, что линии поглощения в спектре Солнца и яркие линии в спектрах паров химических элементов находятся в одном и том же месте спектра и что по линиям в спектре можно определять химический состав светящегося газа. Так был открыт спектральный анализ. Уже к концу XIX в. были сфотографированы спектры звезд и доказано, что во всех небесных объектах встречаются одни и те же химические элементы (см. вклейку VI).

В середине и конце XIX в. были открыты законы излучения (Л. Больцман, В. Вин, М. Планк) и установлено, что и Солнце, и звезды представляют собой раскаленные газовые шары. Но только в середине XX в. получила развитие теория излучения, объяснившая, как и в каких условиях формируется наблюдаемое излучение звезд и других небесных объектов. Это привело к появлению нового раздела астрономии — *астрофизики.*

Астрофизика изучает физическую природу небесных тел, физические процессы, в них происходящие, строение и эволюцию как отдельных небесных тел, так и их систем.

Развитие астрофизики в значительной мере определялось развитием средств наблюдений. Ведь ничего, кроме света, к нам от далеких астрономических объектов не приходит. До конца XIX в. небесные объекты рассматривались в телескоп непосредственно глазом. Постепенно основным методом регистрации излучения стала фотография. А к концу XX в. она, в свою очередь, была вытеснена методами современной электронной техники.

В 40—50-е гг. XX в. начала развиваться радиоастрономия, т. е. исследование радиоизлучения небесных тел. Расширение диапазона волн, доступного наблюдению, привело не только к открытию принципиально новых объектов, таких, как пульсары и квазары, но и к существенному расширению наших знаний о природе уже известных объектов, в частности Солнца. Были построены поистине гигантские радиотелескопы, как поворотные, так и стационарные (см. оборот форзаца I). Самым большим стационарным радиотелескопом является РАТАН-600 в обсерватории РАН на Северном Кавказе.

Радиотелескопы легко объединить в сеть. Это могут быть телескопы, расположенные в разных частях Земли или в непосредственной близости. Совместная их работа позволяет получить интерферометры с базой в несколько тысяч (!) километров или эквивалент зеркала диаметром в многие сотни метров. С помощью таких телескопов можно получить разрешение, сравнимое с тем, которое дают оптические телескопы, или даже лучше.

С началом космической эры (1957 г.) начались исследования в ранее недоступных диапазонах излучения: инфракрасном, ультрафиолетовом, рентгеновском. Особое значение имеет единственный пока космический телескоп Хаббла (см. оборот форзаца I). С введением в строй 10-метровых телескопов астрономы получили оптическое разрешение, сравнимое с разрешением космического телескопа, но по-прежнему лишь космическому телескопу доступны ультрафиолетовый и инфракрасный диапазоны.

Бурный прогресс техники наблюдений привел к ряду замечательных открытий. Были уточнены наши знания о малых планетах, открыты газопылевые облака у некоторых звезд (возможно, это начало формирования новых планетных систем), рентгеновские источники.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Что называется созвездием? Какие звезды относятся к данному созвездию? Как называются звезды? Кто может давать названия звездам? Перечислите известные вам созвездия.

2. Что такое планета? Чем отличаются планеты от звезд при наблюдении невооруженным глазом или в телескоп?

3. Приведите основные особенности движения планет, Луны и Солнца среди звезд.

4. Перечислите открытия Галилея, свидетельствующие в пользу системы Коперника.

5. Какие характеристики телескопа наиболее важны? Что такое адаптивная оптика, для чего она нужна?

6. Перечислите основные разделы астрономии.

7. Что такое параллакс? Что можно определить с его помощью?

8. Что такое астрономическая единица, парсек и световой год?

9. Параллакс первой звезды равен 0,02″, вторая находится на расстоянии 40 пк от Солнца, третья — на $2 \cdot 10^7$ а. е., четвертая — на 125 св. лет. Расположите звезды в порядке увеличения расстояний.

10. Какая из двух звезд расположена ближе к Солнцу — та, которая находится в 25 пк, или та, от которой свет идет 60 лет?

11. В нашем распоряжении 10-метровый телескоп. Сможем ли мы увидеть Землю из другой планетной системы, расположенной от нас на расстоянии 1 кпк?

Глава II

ВИДИМЫЙ МИР

§ 3. НЕБЕСНАЯ СФЕРА И КООРДИНАТЫ НА НЕЙ

1. Небесная сфера. Астрономия — наблюдательная наука. Получить информацию о небесных светилах можно только путем наблюдений. Но чтобы наблюдать светило, нужно знать, в каком направлении оно находится. Это необходимо, чтобы направить на него телескоп. В частности, нужно знать, в какое время оно вообще видно, чтобы не пытаться увидеть объект днем (если объект не Солнце). Другими словами, необходимо определить, где на небесной сфере находится интересующий нас объект и когда его можно увидеть. Это первая задача астрометрии — одного из разделов астрономии.

Очень важную информацию можно получить, исследуя видимые движения звезд. Перемещение светила по небесной сфере может быть обусловлено движением наблюдателя или движением самого объекта. Видимые смещения, как правило, исключительно малы. Ведь расстояния до небесных светил огромны. Объекты, расположенные в нескольких сотнях тысяч или десятках миллионов километров,— это ближайшие к нам объекты. Но для того чтобы было возможно определить эти расстояния, нужно знать точное положение светил, которые мы наблюдаем. Это вторая задача астрометрии.

Не менее важно следить за временем. Хотя существуют эталоны времени, созданные физиками, намного более точные, чем астрономические, роль астрономических наблюдений попрежнему очень велика. Астрономы могут точно измерять большие и очень большие промежутки времени совершенно независимыми методами, что является важным элементом системы хранения времени. Это третья задача астрометрии.

Наконец, физики, геологи, геофизики, моряки и летчики, космонавты и другие специалисты нуждаются в определении инерциальной системы отсчета, что также является важной задачей астрометрии. Все эти задачи решаются с помощью небесной сферы. Это четвертая задача астрометрии.

Для решения таких задач астрометристы создают сверхточные каталоги положения звезд, т. е. списки звезд с указанием их точных координат на данный момент времени.

Воображаемая сфера произвольного радиуса с центром в произвольной точке, на поверхности которой нанесены положения светил так, как они видны на небе в некоторый момент времени из данной точки, называется небесной сферой.

Радиус небесной сферы произволен, и мы можем принять его настолько большим, что нам будет безразлично, где находится ее центр: в глазу наблюдателя (т. е. одного из вас), в центре Земли, в центре Солнца или где-то на одной из планет нашей Солнечной системы. Это возможно, поскольку большинство светил находится настолько далеко, что если смотреть с них на Солнечную систему, то она практически не будет отличаться от точки. Если говорить более точно, то два луча, направленные из Солнца и с Земли или тем более из разных точек Земли, даже к ближайшей звезде, практически параллельны. Если мы говорим о планетах Солнечной системы или о Луне, то различие направлений придется учитывать, но это лишь незначительно усложнит задачи астрометрии, которые перечислены выше и которые достаточно просто решаются с помощью небесной сферы.

Для того чтобы было возможно решать эти задачи, на небесную сферу наносят основные точки и круги. (В астрономии принято называть окружность на небесной сфере кругом.)

Начнем построение небесной сферы (рис. 12). Очевидно, что в центре небесной сферы находится другая сфера, а именно Земля, на поверхности которой в некоторой точке находится наблюдатель. Земля вращается, что дает нам возможность выделить некоторую прямую — ось вращения Земли (обычно строим ось мира PP' и экватор). Соответственно на небесной сфере строим ось мира (PP' — линия, параллельная оси вращения Земли и проходящая через центр небесной сферы) и небесный экватор (слово «небесный» обычно опускают). Пере-

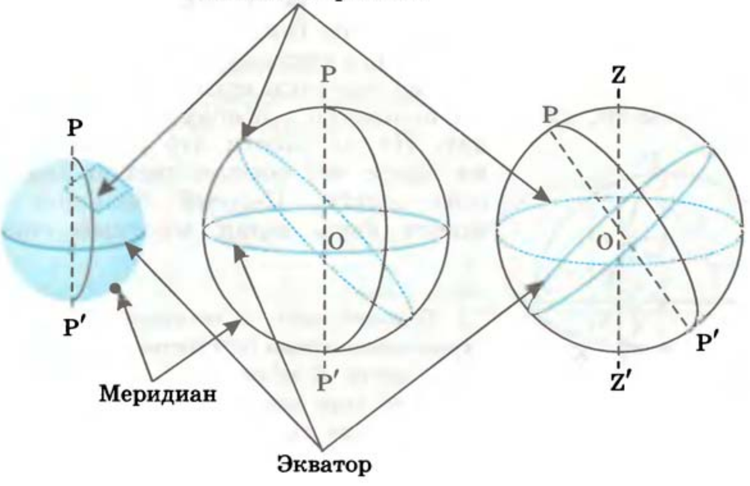


Рис. 12. Построение небесной сферы.

сечение оси мира и небесной сферы определяют полюсы — северный P и южный P'.

Большой круг, плоскость которого перпендикулярна оси мира, называется небесным экватором (слово «небесный» можно опустить). Он пересекается с горизонтом в точках востока и запада.

Вертикальная линия (OZ) является продолжением радиуса Земли, она пересекает небесную сферу в двух точках. Та, что находится над головой, называется «зенит», противоположная ей — «надир». Перпендикулярная ей плоскость — это плоскость горизонта, которая образует при пересечении с небесной сферой математический горизонт (слово «математический» можно опустить).

При изображении небесной сферы принято ориентировать ее так, чтобы вертикальная линия была в центре, а ось мира наклонена к ней.

Две прямые (в нашем случае ось мира и вертикальная линия) определяют плоскость небесного меридиана, а ее пересечение с небесной сферой — большой круг* — небесный меридиан (замечание о слове «небесный» остается в силе). Меридиан пересекается с горизонтом в двух точках — точке севера N и точке юга S. Небесный меридиан является проекцией земного меридиана на небесную сферу.

Все эти элементы небесной сферы связаны с наблюдателем. Ось мира и экватор общие для всех наблюдателей на Земле; вертикальная линия, зенит, надир, плоскости меридиана и горизонта свои для каждого наблюдателя. Их положение относительно других элементов небесной сферы определяется положением наблюдателя на поверхности Земли.

2. Координаты на небесной сфере. Рассмотрим, как строятся системы координат на сфере (рис. 13). Способ построения похож на способ построения системы координат на плоскости, но некоторые отличия все-таки есть.

Выберем то, что будет положено в основу системы координат. На плоскости это две прямые, а на сфере это соответственно два больших круга. Первый большой круг может быть задан многими способа-

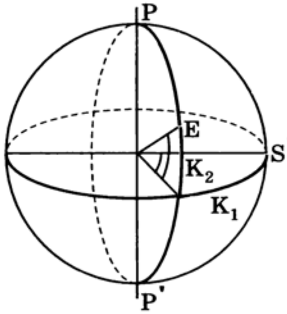


Рис. 13. Система координат на сфере.

---

*Большой круг — окружность, получаемая пересечением сферы плоскостью, проходящей через ее центр. Если плоскость не проходит через центр, то круг называется малым. Расстояние, измеренное по поверхности сферы, между двумя точками большого круга является минимальным. Это говорит о прямой аналогии между прямыми на плоскости и большими кругами на сфере.

ми: можно задать полюс — точку P (см. рис. 13). Тогда можно провести через эту точку диаметр и в качестве первого большого круга взять круг, плоскость которого перпендикулярна диаметру и проходит через центр сферы. Можно сразу взять диаметр, отметить точки P и P' и назвать их полюсами. Наконец, можно взять плоскость, в центре сферы провести к ней перпендикуляр и отметить точки полюсов (точки пересечения перпендикуляром). Таким образом будет получен первый большой круг. Второй круг проводится так, как это выгодно наблюдателю. Задается некоторая ось, и второй большой круг образуется плоскостью, содержащей обе оси. Плоскости обоих больших кругов будут перпендикулярны друг другу, следовательно, и сами круги будут перпендикулярны друг другу. Можно определить некоторую точку на основном круге и вести отсчет координат по самому большому кругу. Координатами будут k_1 и k_2 (углы или дуги соответственно).

Рассмотрим теперь конкретные системы координат, которые употребляются в астрономии.

1. Горизонтальная система координат. За основу принята вертикальная линия ZZ' (рис. 14). Основной большой круг — математический горизонт (слово «математический» можно опустить).

Для измерения координат проводится большой круг (круг высот) от зенита Z через светило (Σ) до надира Z'. Координатой служит высота (h), измеряемая от горизонта дугой круга склонений до светила (или соответствующим центральным углом). Часто употребляется зенитное расстояние z, равное дуге того же круга от зенита до светила. Очевидно, что $z+h=90°$.

Другой координатой служит азимут — дуга горизонта (или соответствующий угол), отсчитываемая от точки юга по направлению к западу.

Горизонтальная система координат жестко связана с наблюдателем. Для каждого наблюдателя существует своя горизонтальная система координат.

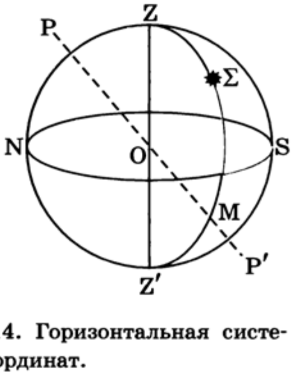


Рис. 14. Горизонтальная система координат.

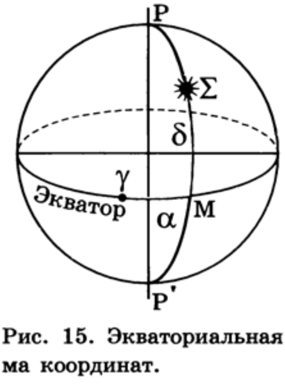


Рис. 15. Экваториальная система координат.

2. Экваториальная система координат (рис. 15). Основная линия — ось мира PP'. Отсчет координат ведется по большому кругу — кругу склонений PMP', проведенному от полюса через светило. По кругу склонений от экватора в обе стороны отсчитывается координата δ — склонение. Другая координата — прямое восхождение α — отсчитывается от точки весеннего равноденствия ♈ (см. § 5, п. 3) в направлении, противоположном направлению вращения небесной сферы. В этой точке Солнце в своем годичном движении пересекает экватор 21 марта — в день весеннего равноденствия.

В отличие от других координат α измеряется в особой часовой мере углов. Окружность делится на 24 ч ($24^{ч}$), час — на 60 мин ($60^{м}$), минута — на 60 с ($60^{с}$). Соотношения между градусной и часовой мерами даны в таблице 2.

Таблица 2

$1^{ч}$	15°	1°	$4^{м}$
$1^{м}$	$15'$	$1'$	$4^{с}$
$1^{с}$	$15''$		

Экваториальная система координат жестко связана с небесной сферой, поэтому она применяется для создания звездных каталогов и карт.

3. Эклиптическая система координат. Эта система является аналогом экваториальной системы координат, но в качестве основной плоскости принимается плоскость эклиптики — плоскость, параллельная плоскости орбиты Земли. Координаты — широта и долгота. Система применяется при расчетах движения планет и затмений.

4. Галактическая система координат. Основная плоскость — плоскость симметрии Галактики. Координаты — галактические широта и долгота, которые отсчитываются от направления на центр Галактики.

3. Высота полюса над горизонтом. Поскольку координаты в горизонтальной системе координат показывают нам, в какой части видимой полусферы неба мы найдем интересующее нас светило, а экваториальная система позволит определить его положение на небесной сфере, нам нужно уметь переходить от одной системы к другой. Очевидно, что для такого перехода требуется прежде всего сориентировать одну систему координат относительно другой. Для этого нам нужно сориентировать сначала полярную ось относительно вертикали, затем найти поворот вращающейся небесной сферы относительно меридиана. Сначала сориентируем ось мира.

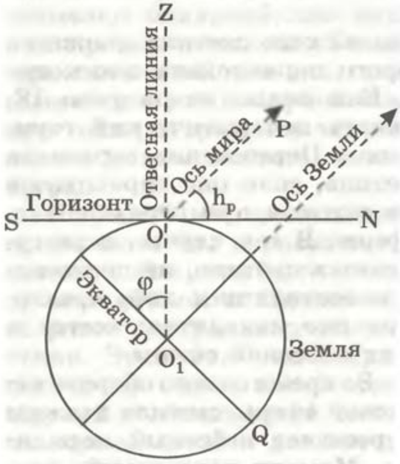


Рис. 16. Определение высоты полюса над горизонтом.

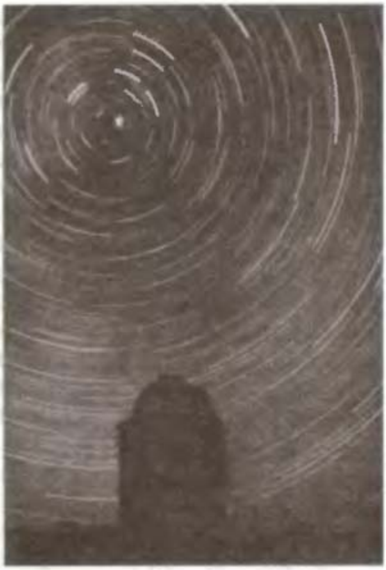


Рис. 17. Фотография околополюсной части неба с экспозицией около 4 ч.

Обратимся к рисунку 16. На нем изображено сечение Земли плоскостью географического меридиана, проведенного в месте наблюдения. Эта плоскость всегда совпадает с плоскостью небесного меридиана того же места. Наблюдатель находится в точке *O*.

Угол между плоскостью экватора и радиусом, проведенным к точке *O*, есть широта места наблюдения (φ). Угол h_p называется *высотой полюса над горизонтом*. Очевидно, что эти углы равны (как углы со взаимно перпендикулярными сторонами). Если определить высоту Полярной звезды над горизонтом, то, поскольку эта звезда (она же α Малой Медведицы) находится вблизи Полюса мира, можно оценить широту места наблюдения. Более точный метод определения широты будет рассмотрен позже.

Зная широту места наблюдения, мы можем правильно ориентировать небесную сферу относительно наблюдателя, что позволяет решать задачи о видимости или невидимости звезд, времени их восхода и захода, продолжительности дня и ночи и т. д.

4. Вращение небесной сферы. Небесная сфера вращается. В этом нетрудно убедиться, просто наблюдая изменение положения небесных светил относительно наблюдателя или горизонта. Если направить фотоаппарат на звезду Малой Медведицы и открыть объектив на несколько часов, то изображения звезд на фотопластинке опишут дуги, центральные углы которых одинаковы (рис. 17).

Из-за вращения небесной сферы каждое светило движется по малому кругу, плоскость которого параллельна плоскости экватора — суточной параллели. Как видно из рисунка 18, суточная параллель может пересекать математический горизонт, но может и не пересекать его. Пересечение горизонта светилом называется восходом светила, если оно переходит в верхнюю часть небесной сферы, и заходом при переходе светила в нижнюю часть небесной сферы. В том случае, если суточная параллель, по которой движется светило, не пересекает горизонта, светило называется невосходящим либо незаходящим в зависимости от того, где оно находится: всегда в верхней или всегда в нижней части небесной сферы.

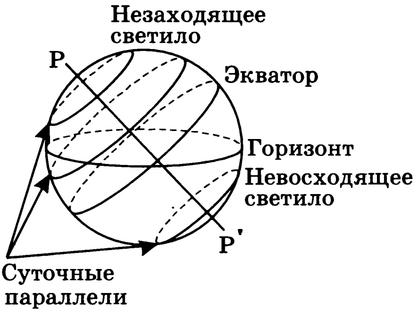


Рис. 18. Суточные параллели.

За время одного оборота небесной сферы светило дважды пересекает небесный меридиан. Момент пересечения светилом меридиана называется *кульминацией*: верхней, если светило пересекает меридиан в той его половине, которая содержит зенит, или нижней, если — в той, которая содержит надир.

5. Ориентация экваториальной системы координат. Небесная сфера вращается, но горизонтальная система координат, жестко связанная с наблюдателем, остается неподвижной. Именно поэтому в разное время мы видим одно и то же светило в разных частях небосвода. Но нам нужно определить, когда и где то или иное светило находится над горизонтом. Если мы не сможем это узнать, то и каталоги, и сама экваториальная система координат лишаются смысла. Задача эта называется «переход от экваториальной системы координат к горизонтальной» (рис. 19).

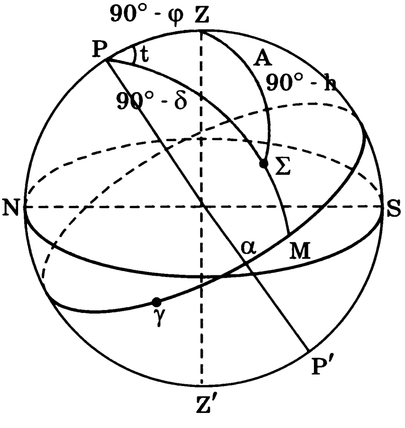


Рис. 19. Переход от экваториальной системы координат к горизонтальной.

Первая часть задачи решается сравнительно легко. На наших схемах мы должны наклонить полярную ось под углом φ к горизонту. Так же мы наклоним и одну из осей (ее называют полярной, она должна быть параллельна оси мира) монтировки телескопа. Теперь будем вращать телескоп вокруг горизонтальной оси так, чтобы угол между оптической осью телескопа и его полярной осью был равен δ. Чтобы найти нужную звезду, вращаем телескоп вокруг полярной оси. Найдя ее, мы можем следить за звездой, следуя вращению небесной сферы.

Но такой метод не слишком удобен. Ведь нужная звезда может быть под горизонтом или зайти слишком быстро после начала наблюдений, т. е. нужно вычислить еще и угол между меридианом и кругом склонений звезды. По определению он равен двугранному углу между соответствующими плоскостями. Этот угол t на рисунке 19 называется часовым углом, поскольку определяется временем, которое проходит между верхней кульминацией светила и моментом наблюдения (как он определяется и для чего, см. в § 6).

6. Определение высоты светила в моменты кульминаций. Для многих задач представляет интерес определение высоты светила в верхней и нижней кульминациях. На рисунке 20 показана плоскость меридиана. PP' — ось мира и ZZ' — вертикальная линия, QQ' и NS — проекции экваториальной и горизонтальной плоскостей на плоскость меридиана. Очевидно, что в кульминациях круг склонений совпадает с меридианом. Точки Σ и Σ' отмечают положения звезды в верхней и нижней кульминациях. Из рисунка 20 легко видеть, что

$$\begin{cases} h_{\text{в}} = 90^\circ - \varphi + \delta, \\ h_{\text{н}} = -90^\circ + \varphi + \delta. \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, получим

$$\delta = \frac{h_{\text{в}} + h_{\text{н}}}{2}, \quad \varphi = 90^\circ - \frac{h_{\text{в}} - h_{\text{н}}}{2}.$$

Если оказывается, что в нижней кульминации высота звезды больше нуля, то звезда никогда не заходит и является незаходящей. Если же в верхней кульминации высота светила меньше нуля, то оно не наблюдается на этой широте. Такая звезда невосходящая. Из вышеприведенных формул можно получить интересное и простое следствие: если

$$|\varphi| + |\delta| \geqslant 90^\circ,$$

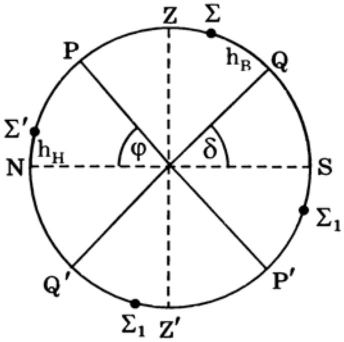


Рис. 20. Определение широты места наблюдения и склонения звезды.

то звезда незаходящая, если φ и δ имеют одинаковые знаки, и невосходящая, если φ и δ имеют разные знаки.

7. Звездные карты и каталоги. Астрономы широко используют звездные карты, построенные по тем же принципам, по которым строятся географические карты. На картах неба (звездных картах) наносится сетка экваториальных координат, отмечается положение звезд, обычно кружками, диаметр которых пропорционален видимой яркости, отмечается положение других астрономических объектов. Но значительно чаще используются каталоги. Это списки, в которых перечислены те или иные объекты и даны их характеристики. Так, астрометрические каталоги содержат только координаты звезд, определенные с максимально возможной точностью. Периодически эти каталоги пересматриваются, так как уточняются координаты. Часто в каталогах приводятся данные о собственных движениях звезд и параллаксах. В них же содержится информация об яркости звезд, иногда эта информация содержится на прилагаемых к каталогу картах.

Астрофизические каталоги наряду с координатами (точность которых значительно меньше, так как они служат лишь для отождествления объекта) содержат сведения, определяемые задачей каталога: о цвете, температуре, каких-нибудь специфических характеристиках, например о переменности или двойственности, и т. д. В других каталогах собраны сведения о галактиках, туманностях и т. п. Часто для указания, о каком именно объекте идет речь, астроном ограничивается указанием каталога и номера в нем.

§ 4. ИЗМЕНЕНИЕ КООРДИНАТ СО ВРЕМЕНЕМ

1. Прецессия земной оси. Переопределяя координаты звезд и сравнивая их с найденными ранее, Гиппарх во II в. до н. э. обнаружил, что координаты всех звезд изменились. Изучив эти изменения, он нашел, что плоскость небесного экватора медленно поворачивается навстречу годичному движению Солнца (т. е. с востока к западу) на 50,3″ в год. Это движение было названо предварением равноденствий или *прецессией*, так как поворот плоскости экватора приводит к смещению точки весеннего равноденствия навстречу кажущемуся годичному движению Солнца и весеннее равноденствие происходит раньше, чем это было бы при неподвижном экваторе.

Поворот плоскости экватора эквивалентен перемещению оси вращения Земли, а следовательно, и Полюса мира, который движется среди звезд, описывая полный круг за 26 000 лет. На рисунке 21 видно, что 3—4 тыс. лет назад ближайшей к полюсу (Полярной) была звезда α Дракона, в наше время По-

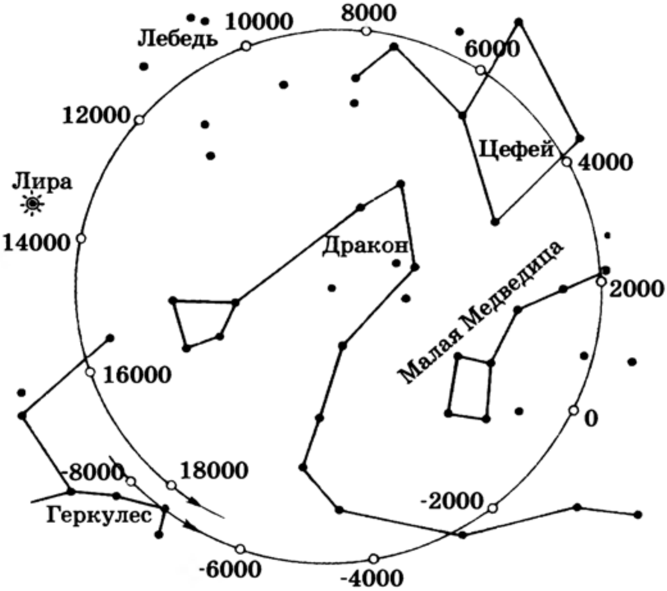


Рис. 21. Прецессия земной оси. Траектория Северного полюса мира на карте околополярной области небесной сферы.

лярной служит α Малой Медведицы, через 12 000 лет полюс переместится к самой яркой звезде северного неба — Веге (α Лиры). Точка весеннего равноденствия 4—5 тыс. лет назад была в созвездии Овна, сейчас она уже в созвездии Водолея. Причины, вызывающие прецессию, рассмотрены в § 9.

Изменение положения точки весеннего равноденствия эквивалентно изменению начальной точки отсчета координат. Эти изменения легко прогнозируются, так как движение плоскости экватора известно.

2. Собственное движение звезд. В древности считали, что звезды прикреплены к небесной сфере и, следовательно, не могут передвигаться, и называли их неподвижными. Теперь мы знаем, что звезды — это свободные тела, естественно, свободно перемещающиеся в пространстве. Однако они очень далеки, и, несмотря на то что они движутся с достаточно большими скоростями, движение их проекций на небесную сферу обнаружить очень трудно. Движение звезды приводит к тому, что ее координаты изменяются. Смещаясь, звезда описывает на небесной сфере дугу, т. е. ее положение смещается на угол, соответствующий этой дуге.

Собственным движением звезды называется угол μ, на который сместилась звезда по небесной сфере в течение года вследствие своего движения в пространстве.

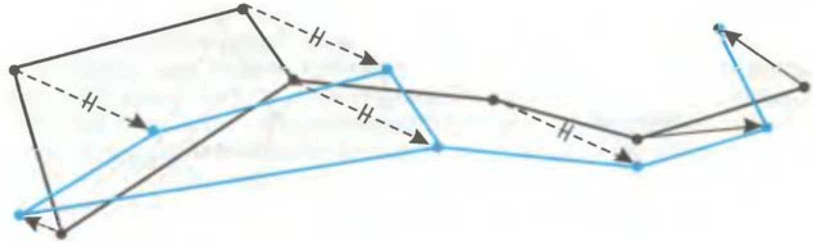


Рис. 22. Изменение вида ковша Большой Медведицы за 10 000 лет.

Собственные движения звезд невелики. О них можно судить по рисунку 22. Отметим, что собственные движения звезд Большой Медведицы далеко не самые малые. Самая быстрая звезда — Летящая Барнарда в Змееносце — смещается на видимый диаметр Луны за 180 лет. Ее собственное движение равно 10,5″ в год.

Для большинства звезд собственные движения меньше 0,02″ в год. Тем не менее изучение даже столь малых смещений дает много информации о строении нашей звездной системы.

Звезды перемещаются в пространстве со скоростью $\vec{v}$, которую можно представить в виде суммы двух скоростей (рис. 23), одна из которых направлена по лучу зрения (ее называют лучевой скоростью v_r), другая — перпендикулярно ей (эту скорость называют тангенциальной v_t). Тангенциальная скорость выражается через параллакс и собственное движение следующим образом:

$$v_t = 4{,}74 \cdot \mu / \pi'',$$

где π'' — параллакс звезды, а v — скорость (км/с). Лучевая скорость определяется из спектральных исследований по эффекту Доплера.

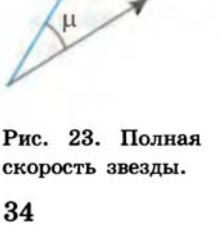


Рис. 23. Полная скорость звезды.

Эффект Доплера

Эффект Доплера заключается в следующем. Пусть длина волны света, принимаемого от неподвижного источника, равна λ_0. Тогда от движущегося относительно наблюдателя тождественного источника придет свет с длиной волны $\lambda=\lambda_0\left(1+\frac{v}{c}\right)$, где v — скорость по лучу зрения; c — скорость света. Лучевая скорость положительна, если источник удаляется от нас; в этом случае все спектральные линии смещаются в сторону больших длин волн, т. е. к красному концу спектра.

Сфотографировав спектр звезды (или любого другого объекта), измерив длины волн и сравнив их с длинами волн в стандартном спектре неподвижного источника, мы определим его лучевую скорость.

Если нам каким-то образом удается определить угол между направлениями на звезду и полной скорости $\vec{v}$ (а это иногда удается, причем сразу для группы звезд), то приведенная формула дает возможность определить расстояния до этих звезд.

§ 5. ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА СРЕДИ ЗВЕЗД. ЭКЛИПТИКА

1. Суточное движение звезд, Солнца и Луны. Изменение положения небесного светила относительно горизонта в течение суток называется *суточным движением светила*. Вызвано это вращением небесной сферы, т. е. вращением Земли. Поскольку расположение звезд практически не меняется, то суточное движение звезд также не меняется. Звезды восходят и заходят всегда в одном и том же месте горизонта. В течение суток звезда движется всегда по одной и той же суточной параллели, восходя, кульминируя и заходя в одной и той же точке горизонта. То, что эти явления в разные дни года происходят в разное время суток, к суточному движению звезды не имеет отношения.

Иначе происходит движение Солнца и Луны. Даже не очень внимательный наблюдатель сразу заметит, что Луна каждый день восходит и заходит в разных точках горизонта. Для Солнца это заметить немного труднее: нужно замечать, где оно восходит или заходит, в течение нескольких дней или даже месяцев.

Поэтому Солнце и Луна движутся суточным движением каждый день по разным суточным параллелям, что обусловлено перемещением этих светил среди звезд.

В результате движения Солнца и Луны среди звезд ежедневно меняется их склонение. Естественно, что в этом случае меняется и их высота в кульми-

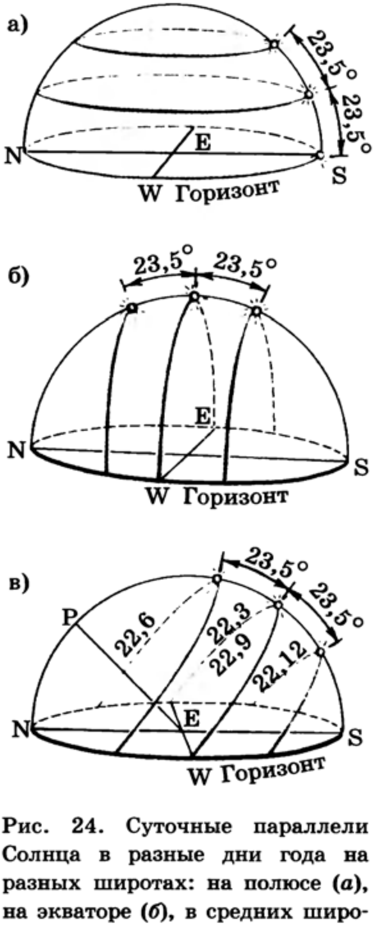


Рис. 24. Суточные параллели Солнца в разные дни года на разных широтах: на полюсе (*а*), на экваторе (*б*), в средних широтах (*в*).

нации, меняются суточные параллели, по которым они движутся.

На рисунке 24 показаны суточные параллели Солнца в разные дни года: 12 марта и 23 сентября, 22 июня и 22 декабря. Рисунок сделан для экватора (рис. 24, *а*), для средних широт северного полушария (рис. 24, *б*) и северного полюса (рис. 24, *в*). На экваторе плоскость горизонта делит все суточные параллели пополам, поэтому на экваторе всегда день и ночь имеют равную продолжительность. На средних широтах 22 июня бо́льшая часть суточной параллели находится выше горизонта, т. е. день длиннее ночи; 22 декабря обратная картина: ночь длиннее дня. На полюсе все суточные параллели параллельны плоскости горизонта. Там день и ночь равны, продолжаясь по полгода. (Строго говоря, день несколько длиннее, поскольку из-за преломления света в атмосфере диск Солнца кажется приподнятым над горизонтом.)

2. Сумерки. Когда Солнце опускается за горизонт, оно некоторое время продолжает освещать верхние слои атмосферы. Этот период называется сумерками — вечерними после захода Солнца и утренними перед восходом. Считается, что гражданские сумерки (освещенность на поверхности Земли достаточна, чтобы читать газету) продолжаются до тех пор, пока высота Солнца $h_{\odot}>-7^{\circ}$; затем наступают астрономические сумерки, которые продолжаются до тех пор, пока $h_{\odot}>-17^{\circ}$.

Если в нижней кульминации Солнце не опускается за горизонт больше чем на 7°, то утренние и вечерние гражданские сумерки перекрываются и, собственно, ночь отсутствует. Это наблюдается на широтах, больших 59°30′.

В Санкт-Петербурге этот период назван Ф. М. Достоевским белыми ночами; они продолжаются в течение 40 дней, со 2 июня по 12 июля, когда уличные фонари не зажигаются. Теперь выражение «белые ночи» стало термином. Они бывают везде, где сливаются вечерние и утренние сумерки.

Период, пока Солнце опускается до −17°, называется астрономическими сумерками. После этого наступает ночь. Астрономические сумерки могут длиться всю ночь на широтах, больших 49°30′. В этот период на таких широтах искусственные спутники Земли не заходят в тень и могут наблюдаться всю ночь.

3. Движение Солнца среди звезд. Определяя высоту Солнца в полдень, т. е. в момент верхней кульминации, уже древнеегипетские астрономы установили, что Солнце движется по эклиптике — большому кругу, наклоненному к экватору под углом 23°27′ навстречу вращению небесной сферы. На рисунке 25 показаны эклиптика и ее полюс *П*. Это движение называется годичным движением Солнца. За сутки Солнце проходит по эклиптике 0,986°. Это связано с тем, что в Древних Вавилоне и Египте год считался равным 360 дням. Поэтому круг эклиптики был разделен на 360 «шагов» — градусов. Потом установили, что год продолжается 365 дней, но деление окружности на 360° сохранилось до наших дней.

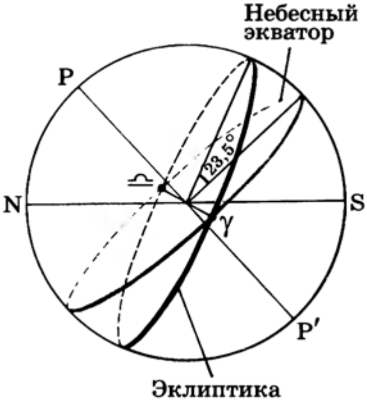


Рис. 25. Экватор и эклиптика.

Эклиптика пересекается с экватором в двух точках (см. рис. 25). Одна из них, а именно та, в которой Солнце переходит из южного полушария в северное, называется точкой весеннего равноденствия (♈), другая называется точкой осеннего равноденствия (♎). Значок для точки весеннего равноденствия соответствует знаку зодиака Овен, а для точки осеннего равноденствия — знаку Весы. Когда-то (3—4 тыс. лет тому назад) знаки зодиака совпадали с созвездием, которое они обозначали. Но экватор (ось мира или ось вращения Земли) поворачивается, и точки весеннего и осеннего равноденствия смещаются среди звезд навстречу движению Солнца. Это смещение называется прецессией (мы вернемся к нему в главе IV). Сейчас точка весеннего равноденствия находится в созвездии Водолея и связь между созвездиями и знаками зодиака полностью нарушена.

§ 6. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

1. Сутки. Для измерения времени нужен периодический процесс, который отличался бы стабильностью и повторялся бы сколь угодно долго. Желательно, чтобы мы могли отмечать малые доли этого процесса. Такой процесс есть: это вращение Земли относительно звезд.

Небесную сферу мы используем как часы. Но в этих часах циферблатом служит звездное небо, а стрелкой — небесный меридиан. Часы не совсем обычные: в них неподвижна стрелка, а циферблат вертится.

За единицу времени принимаем звездные сутки.

Звездные сутки — промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями любой звезды. Принято считать за начало звездных суток момент кульминации точки весеннего равноденствия.

Сутки по традиции делятся на 24 ч, час — на 60 мин, минута — на 60 с. Поскольку мы измеряем прямое восхождение в часах, минутах и секундах (см. § 3, п. 3), то момент времени по звездным часам определяется по прямому восхождению

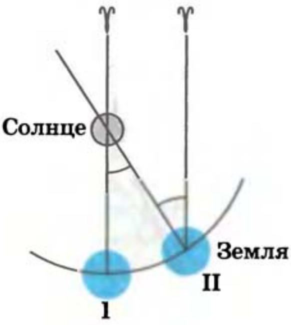


Рис. 26. Солнечные и звездные сутки.

звезды, которая в данный момент кульминирует. Отсюда следует, что звездное время измеряется часовым углом точки весеннего равноденствия (см. рис. 19) аналогично тому, как мы определяем время по углам поворота часовой и минутной стрелок. Действительно, по определению часовой угол точки весеннего равноденствия равен нулю в момент, когда звездное время равно нулю. Часовой угол меняется равномерно, поскольку небесная сфера тоже вращается равномерно, т. е., измерив часовой угол в часовой мере, мы сразу получим время, за которое небесная сфера повернулась на этот угол.

Из рисунка 19 и определения прямого восхождения следует такое соотношение:

$$S=\alpha+t,$$

где S — звездное время, и действует следующее правило: звездное время равно прямому восхождению кульминирующей в этот момент звезды.

Несколько слов о терминологии. В астрономии принято говорить: звездное время, солнечное время, поясное время. Во всех случаях прилагательное определяет, каким методом измеряется время и какой единицей мы пользуемся.

Звездное время исключительно удобно для астрономов. Зная его, мы сразу можем сообразить, какие звезды наблюдаются в этот момент времени. Просто его и определять. Конечно, точно (до десятых или сотых долей секунды) его можно установить только с помощью специальных инструментов. Но с точностью до нескольких минут астроном определяет его одним взглядом.

В повседневной жизни пользоваться звездными часами очень неудобно. Ведь наша повседневная жизнь зависит от Солнца. Нам важно, чтобы в одно и то же время по часам было светло, чтобы сутки начинались ночью, когда мы спим. Поэтому мы измеряем время по солнечным часам и называем его солнечным временем.

Истинными солнечными сутками называется промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями Солнца на одном и том же географическом меридиане.

Солнечные сутки также делят на 24 ч, час — на 60 мин, минуту — на 60 с. По разным причинам за единицу времени принимают не сутки, а секунду. Определяют ее не по вращению Земли, а по колебаниям световой волны определенной длины. Длина секунды выбрана таким образом, чтобы ее продолжительность была максимально близка к длительности 1/86400 средних солнечных суток. Истинное солнечное время аналогично звездному определяется по часовому углу центра истинного Солнца.

Истинные солнечные сутки — период вращения Земли относительно Солнца. Солнце перемещается среди звезд в направлении вращения Земли (к востоку) в среднем на 0,98° в сутки.

Если в некоторый момент времени точка весеннего равноденствия и Солнце кульминируют одновременно (рис. 26, I), то через звездные сутки в кульминации будет точка весеннего равноденствия, а Солнце сместится к востоку и только через 3 мин 56 с пройдет через меридиан, и сутки закончатся (рис. 26, II), т. е. солнечные сутки длиннее звездных. Скорость перемещения Солнца среди звезд меняется. Летом оно движется медленнее, зимой — быстрее, сутки летом немного короче, чем зимой, поэтому пользоваться такой единицей времени неудобно.

Таким образом, в основу измерения времени положены средние солнечные сутки, т. е. промежуток времени, длительность которого совпадает со средней за год продолжительностью истинных солнечных суток. Наши часы отрегулированы по среднему времени, и проверяются они сравнением вычисленных заранее и наблюдаемых кульминаций звезд и Солнца. Истинные солнечные сутки неодинаковы по продолжительности, поскольку движение Солнца по небесной сфере неравномерно: в июле они длиннее, в январе короче. Поэтому показания часов, идущих по среднему времени, отличаются от показаний часов, идущих по истинному солнечному времени. Различие показаний называется уравнением времени. Уравнение времени обращается в нуль 15 апреля, 14 июня, 1 сентября и 24 декабря. Крайние значения уравнение времени принимает около 11 февраля (+14 мин) и 2 ноября (−16 мин).

В 30-е гг. XX в. было установлено, что Земля вращается неравномерно, вследствие чего сутки удлиняются на 0,0017 с (по другим данным, на 0,0022 с) в столетие. Поэтому астрономы перешли к так называемому эфемеридному времени. Это равномерно текущее время, которое мы подразумеваем в формулах и законах динамики. Именно в нем предвычисляются положения планет и Луны. Единицей эфемеридного времени служит эфемеридная секунда. Длительность эфемеридной секунды максимально близка к длительности среднесолнечной секунды.

Мы определяем координаты малых планет и Луны в моменты времени, фиксируемые по часам, которые мы контролируем, наблюдая кульминации звезд, считая, что Земля вращается равномерно. Далее мы находим в эфемеридах (эфемериды — таблицы, содержащие предвычисленные координаты планеты) момент времени, когда координаты планеты должны были иметь наблюдаемые значения. По расхождению предвычисленного и наблюдаемого моментов времени мы можем судить о неравномерности вращения Земли.

Отличия среднего солнечного времени от эфемеридного настолько малы, что в повседневной жизни они никак не сказываются, но в научных исследованиях, особенно в космонавтике, они весьма важны.

С 1967 г. в физике в качестве эталона времени используются атомные часы. Единицей измерения времени в них служит атомная секунда, выбранная так, чтобы ее продолжительность совпадала с эфемеридной секундой.

Нужно четко представлять себе, что все системы измерения времени относятся к реально и объективно существующему времени и отличаются исключительно выбором периодического процесса, используемого для измерения, и принятыми единицами.

Принято считать, что сутки начинаются в полночь, которая совпадает с нижней кульминацией Солнца. Часы показывают, какая часть суток прошла с момента полуночи. Ясно, что на разных меридианах момент полуночи наступает не в один и тот же момент времени, следовательно, на каждом меридиане часы показывают свое время. Так и было до конца XIX в. Но развитие железных дорог, телеграфа, затем радио привело к тому, что такой порядок исчисления времени стал неудобным. С 1884 г. вся Земля была разбита на 24 часовых пояса. Внутри пояса все часы стали показывать одно и то же время, а в соседних поясах показания их отличались на 1 ч. Границы поясов пытались провести точно по меридиану, но это неудобно, и каждое государство провело их по своему усмотрению. Это время называется поясным. В Советском Союзе с 1930 г. часы переведены на 1 ч вперед. Это время называется декретным. Наконец, с 1986 г. летом стрелки часов переводятся еще на 1 ч вперед, осенью они возвращаются назад. Это время называется летним.

Нужно иметь в виду, что названия: среднее солнечное, поясное, декретное, эфемеридное время — относятся только к показаниям наших часов.

2. Определение долготы места наблюдения и времени восхода и захода светил. Идея способа определения долготы места наблюдения чрезвычайно проста: одновременно установить время в точке, в которой определяется долгота, и показание часов, идущих по местному времени точки, долгота которой известна. До 20-х гг. XX в. эта задача была невероятно трудной, причем именно ее вторая часть: определение времени в точке с известной долготой. Для ее решения, например, в экспедиции капитана Кука в 1772 г. взяли 23 недавно изобретенных хронометра. Для расчетов брали среднее из их показаний. И все равно ошибка определения долготы достигала нескольких градусов. Только в XX в., после изобретения радио, задача стала решаться легко и просто: достаточно было принять сигналы точного времени, передаваемые каждый час известными радиостанциями. Местное же время можно определить по положению Солнца. Затем нужно внести ряд поправок, чтобы перевести среднее время в истинное солнечное, и задача решена. В наше же время навигационные спутниковые системы позволят решить этот вопрос с огромной точностью в автоматическом режиме.

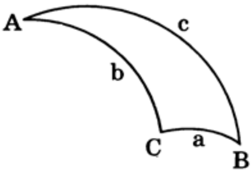


Рис. 27. Сферический треугольник.

Приведем основные формулы сферической тригонометрии:

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A,$$

$$\sin a \cos B = \sin c \cos b - \sin b \cos c \cos A,$$

$$\frac{\sin A}{\sin a} = \frac{\sin B}{\sin b} = \frac{\sin C}{\sin c}.$$

Смысл обозначений виден из рисунка 27. Большие буквы обозначают углы, маленькие — стороны треугольника. И те и другие измеряются в градусах.

Решим одну астрометрическую задачу. Это задача об определении времени восхода и захода Солнца (конечно, эта задача применима для любого светила). На рисунке 19 показана небесная сфера, на которой одновременно нанесены горизонтальная и экваториальная системы координат. Видно, что дуги $PZ=\varphi$, $P\Sigma=90^\circ-\delta$, $Z\Sigma=90^\circ-h$ составляют сферический треугольник. Воспользовавшись соответствующей формулой сферической тригонометрии, получим

$$\sin h = \sin \delta \sin \varphi - \cos \delta \cos \varphi \cos t.$$

Поскольку при восходе и заходе светила h равно нулю, получаем

$$\cos t = -\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi.$$

Для окончательного решения нужно выразить t в часовой мере и прибавить 12 ч, для получения времени восхода следует вычесть t из 12 ч, так как в полдень (12 ч по солнечному времени) $t=0$ по определению.

Задача

Определите продолжительность дня в Москве 22 июня.

Решение

Широта Москвы $\varphi=55^\circ 45'$, $\delta_{\odot}=23^\circ 30'$, отсюда $t=\pm 129^\circ 43'$ переводим в часовую меру, получаем $\pm 8^{ч}\ 9^{м}$ (знак «+» соответствует заходу, знак «−» — восходу Солнца). Длина дня $17^{ч}18^{м}$. Точное значение $17^{ч}33^{м}$.

3. Календарный счет времени. Обращение Земли вокруг Солнца задает нам период времени, больший суток.

Промежуток времени между двумя последовательными прохождениями Солнца через точку весеннего равноденствия называется тропическим годом. Его продолжительность составляет 365,2422 солнечных суток.

Вся хозяйственная жизнь человечества всегда подчинялась двум циклам: суточной смене дня и ночи и годичной смене сельскохозяйственных сезонов. При этом необходимо было иметь единицу времени, которая была бы максимально близка к длительности тропического года, но содержала целое число суток. Такая единица называется календарным годом, а основанная на ней система счета дней — календарем. Создание этой системы затрудняется тем, что тропический год не содержит целого числа дней.

Попытки создать календарь, которым можно было бы пользоваться достаточно длительное время, предпринимались еще в Древнем Египте. Однако первый такой календарь был разработан только в 45 г. до н. э. римским астрономом Созигеном и введен в действие Юлием Цезарем. В этом календаре (его называют юлианским календарем или старым стилем) продолжительность года составляла 365 сут., т. е. он короче тропического. Чтобы приблизить среднюю продолжительность календарного года к длительности тропического, каждые четыре года к февралю добавлялся день. В Древнем Риме он назывался «биссектум» — «второй шестой», откуда и пошло наше выражение «високосный год». В результате средняя продолжительность календарного года стала 365,25 сут., т. е. на 0,0078 сут. больше тропического.

За 400 лет появилось расхождение в 3 сут., что приводило к постепенному смещению дня весеннего равноденствия на более ранние даты. Это вызывало затруднения в определении даты важнейшего христианского праздника Пасхи. Поэтому в 1682 г. римский папа Григорий XIII приказал пропустить в счете 10 дней и впредь не считать високосными те годы, номер которых заканчивается на два нуля, а число столетий не делится на 4. Этот календарь называется григорианским или новым стилем, и мы им пользуемся до настоящего времени. Расхождение со старым стилем до 2100 г. составляет 13 дней.

Счет годов, или летоисчисление, начинается с года, в котором произошло некоторое известное нам событие. Это событие начинает эру. Причем совершенно неважно, было ли это событие реальным или легендарным. Так, мусульмане считают года от вполне реального события — «хиджры», переселения Мухаммеда из Мекки в Медину, а христиане — от времени рождения Христа. Даже если признать, что Иисус Христос был реальной личностью, то все равно год его рождения неизвестен. Но это не имеет никакого значения, поскольку начало нашей эры фиксируется любым годом, в котором произошло известное всем событие. Например, достаточно сказать, что Великая Отечественная война началась в 1941 г., и эра будет установлена.

§ 7. ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ. ЗАТМЕНИЯ

1. Видимое движение Луны. Заметить перемещение Луны среди звезд внимательный наблюдатель может уже через 5—7 мин. При тщательном изучении ее движения уже давно было установлено, что Луна движется по большому кругу, наклоненному к эклиптике приблизительно на 5°. Обычно его называют орбитой Луны, хотя это и не вполне точно. Точки пересечения лунной орбиты и эклиптики называются узлами. Их два: восходящий, в котором Луна переходит в северную полусферу эклиптики, и противоположный ему, нисходящий.

Нужно отметить, что в действительности движение Луны гораздо более сложно. Плоскость орбиты покачивается, и угол ее наклона к эклиптике меняется. Кроме того, плоскость орбиты вращается, совершая полный оборот примерно за 18 лет. При этом точки пересечения лунной орбиты с эклиптикой (восходящий и нисходящий узлы) движутся навстречу Луне и Солнцу.

Перемещаясь среди звезд, Луна меняет свою видимую форму. Явление это называется сменой фаз и вызвано тем, что в зависимости от угла между направлениями на Луну и Солн-

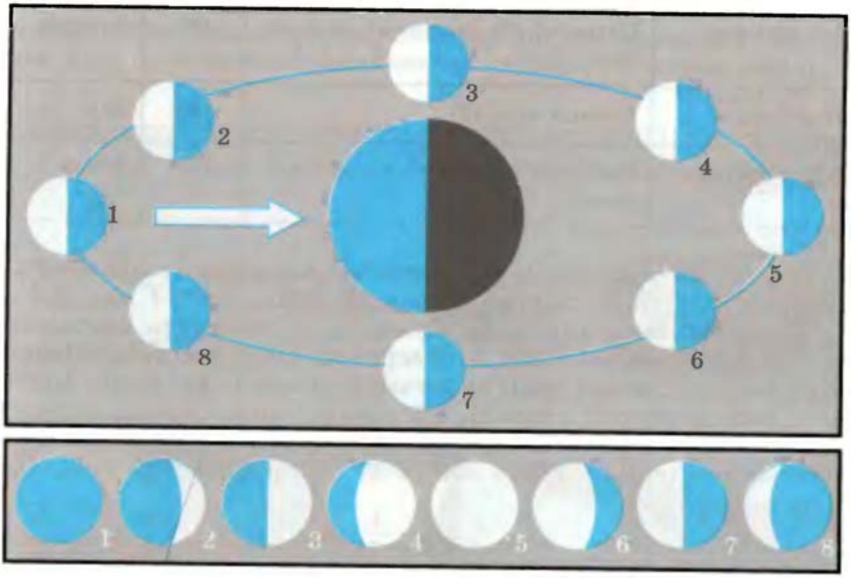


Рис. 28. Смена фаз Луны и ее движение вокруг Земли.

це (равного разности их прямых восхождений) меняется видимая часть освещенного Солнцем полушария Луны. Смена фаз Луны показана на рисунке 28 и приведена в таблице 3. Причина изменения лунных фаз в двух факторах: 1) видимая часть Луны освещена Солнцем; 2) Луна имеет форму шара (рис. 29).

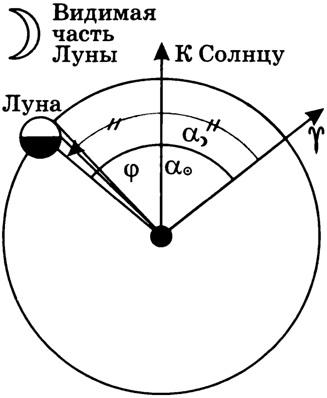


Рис. 29. Причина смены лунных фаз.

Период обращения Луны вокруг Земли относительно звезд — сидерический (от греч. sideros — звезда) месяц — равен 27 дням 7 ч 43 мин 11,3 с.

Но пока Луна сделает полный оборот, Солнце пройдет по эклиптике 27°, и, чтобы оказаться в той же фазе, Луне потребуется еще больше двух суток.

Таблица 3

Название фазы	Вид Луны (цифры на рисунке 28)	Угол фазы	Время видимости
Новолуние	Не видна (1)	0	Не видна
1-я четверть	Полукруг (2) выпуклостью к западу	90°	Вечером
Полнолуние	Полный круг (3)	180°	Всю ночь
3-я четверть	Полукруг (4) выпуклостью к востоку	270°	Утром

Период полной смены фаз Луны называется синодическим месяцем. Его продолжительность 29 дней 12 ч 44 мин 2,8 с.

Из выражения для фазы Луны легко получить соотношение между синодическим и сидерическим периодами. Действительно, изменение фазы за звездное время 1 сут. равно 360°/C (C — синодический период), изменение прямого восхождения Луны — 360°/S (S — сидерический период), а изменение прямого восхождения Солнца 360°/T (T — тропический год). Отсюда следует:

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{S}-\frac{1}{T}.$$

Совершенно так же определяются синодические периоды и для планет. Отметим, что для них синодический период — это промежуток времени между последовательными одинаковыми конфигурациями.

2. Затмения Луны. Луна светит отраженным светом Солнца; поэтому, когда она попадает в тень Земли (рис. 30), она перестает светить — наступает лунное затмение. Строго говоря, Луна продолжает светить за счет того, что часть лучей Солнца, преломляясь в атмосфере Земли, освещает Луну, и мы видим ее в виде темно-красного диска. (Голубые лучи рассеиваются в земной атмосфере, в результате мы видим днем голубое небо и красное Солнце на закате.)

Тень Земли имеет форму конуса, диаметр сечения которого на расстоянии Луны в 2,5 раза больше диаметра Луны, поэтому лунное затмение продолжается довольно долго. Максимальная продолжительность полного лунного затмения 1 ч 45 мин. Затмение видно на всем ночном полушарии Земли. Затмение может быть полным, если Луна входит в тень полностью, или частным, если в тень попадает только часть Луны.

3. Солнечные затмения. Когда тень Луны падает на Землю, наступает солнечное затмение (см. рис. 30). Оно может быть полным там, где падает тень, и частным в области полутени. Если в момент затмения Луна оказывается в самой далекой от Земли точке орбиты, а Земля — в самой близкой к Солнцу, то диск Луны не полностью закрывает диск Солнца, и наступает кольцеобразное затмение.

Тень Луны прочерчивает на Земле длинную полосу шириной не более 200 км, ширина полутени может составлять несколько тысяч километров. Поэтому полные солнечные затмения видны в каждой конкретной местности очень редко, в

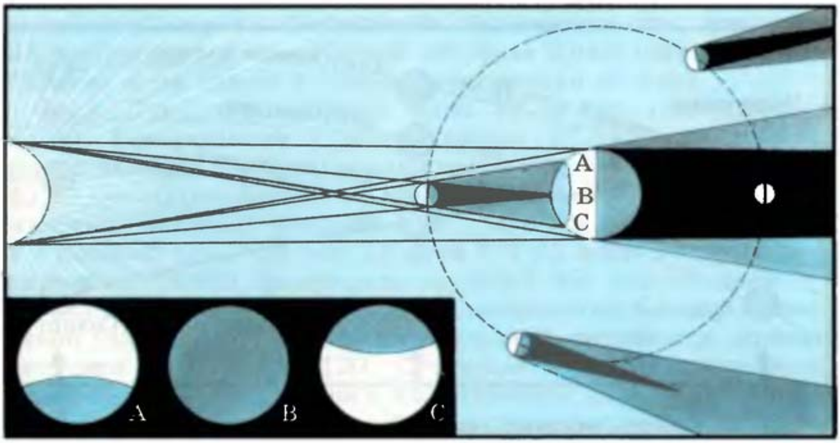


Рис. 30. Схема лунных и солнечных затмений.

среднем раз в 300 лет. В Москве очередное полное затмение Солнца будет в 2126 г. (предыдущее было в 1887 г.). Максимальная продолжительность полного солнечного затмения (на экваторе) 7,5 мин. В местности, далекой от экватора, затмение, как правило, продолжается не более 2—2,5 мин.

4. Условия наступления затмений. Затмение может произойти только в полнолуние (лунное) или в новолуние (солнечное). На рисунках 31, 32 показаны проекции на небесную сферу дисков Луны и Солнца для моментов трех последовательных новолуний и двух последовательных полнолуний. Угол между эклиптикой и лунной орбитой сильно преувеличен.

Обратите внимание на то, что на рисунке 31 показаны три проекции диска Луны и одна проекция диска Солнца, а на рисунке 32 — по одному положению проекции диска Луны и земной тени.

Рассмотрим сначала рисунок 32. В первом полнолунии диски земной тени (на расстоянии Луны) и Луны не совмещаются. В этом полнолунии затмения нет. В момент следующего полнолуния Луна и тень Земли попадают в узел лунной орбиты. Происходит полное лунное затмение.

Затмение (полное или частное) обязательно произойдет, если в момент полнолуния расстояние между центрами тени и Луны окажется меньше суммы их радиусов. Но это возможно только в том случае, если Луна и тень Земли в момент полнолуния окажутся не далее 11° от узла. Участок эклиптики в 22° Солнце проходит за 23 дня. Но в этот промежуток времени полнолуния может и не быть (оно повторяется через 29,5 дня), т. е. лунные затмения происходят не каждый раз, когда земная тень, скользя по эклиптике, подходит к узлу.

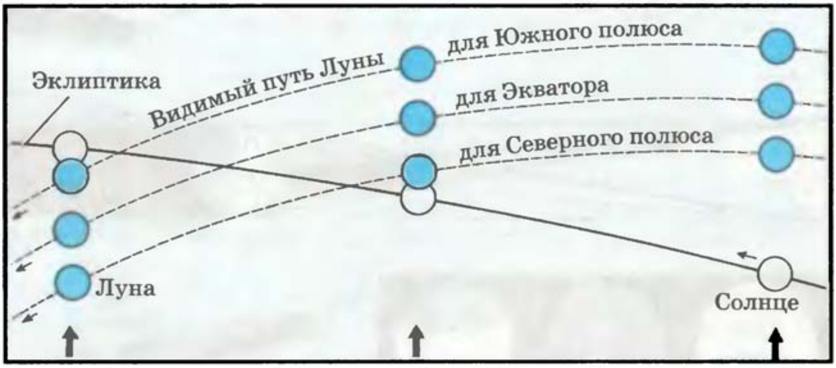


Рис. 31. Положения видимых дисков Солнца и Луны в моменты трех последовательных новолуний для наблюдателей, находящихся на Южном и Северном полюсах Земли и на экваторе.

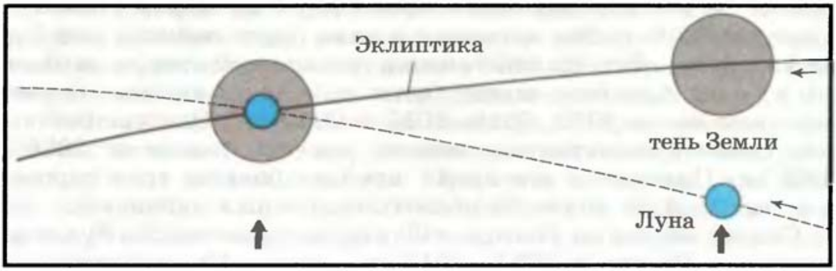


Рис. 32. Положения видимого диска Луны и земной тени на расстоянии Луны во время двух последовательных полнолуний.

Следовательно, лунных затмений в течение года может не быть вообще. Максимальное число лунных затмений в году — два.

Рассмотрим теперь рисунок 31. На нем изображены видимые положения диска Солнца для всех наблюдателей на Земле (одинаковые в данный момент времени) и диска Луны для разных наблюдателей (Луна расположена к Земле очень близко, поэтому каждый наблюдатель проецирует ее на небесную сферу по-своему). Из рисунка видно, что солнечное затмение происходит тогда, когда Солнце проходит через узел лунной орбиты или находится вблизи него (расстояние от узла составляет не более 16°). Солнце проходит его за 32 дня (16 дней до узла и 16 — после). Но за это время обязательно будет хотя бы одно новолуние, а следовательно, и затмение Солнца. Итак, за год произойдет не менее двух, но не более пяти солнечных затмений; общее число затмений в году (солнечных и лунных) — не более семи.

5. Периодичность затмений. Последовательность затмений повторяется почти точно через промежуток времени, который называется «сарос». Повторение обусловлено тем, что затмение происходит в одной и той же фазе Луны (ново- или полнолуние) и на одном и том же расстоянии от узла.

Фазы Луны повторяются через 29,53 сут. (синодический месяц). Возвращение к узлу требует 27,21 сут. (драконический месяц), Солнце возвращается к тому же узлу через 346,53 сут. (драконический год). Оказывается, что 242 драконических месяца = 6585,36 сут., 223 синодических месяца = 6585,32 сут. = 18 лет 11 дней 7 ч 42 мин, 19 драконических лет = 6585,78 сут., т. е. через 18 лет 11 дней 7 ч 42 мин затмение повторится, но положение Солнца относительно узла несколько изменится, и зона видимости затмения сместится примерно на 120°. В течение каждого сароса происходит 70 затмений, из них 41 солнечное (примерно 10 полных) и 29 лунных.

В XXI в. в России можно будет наблюдать только несколько полных солнечных и лунных затмений. Так, ближайшие полные солнечные затмения произойдут 29 марта 2006 г. и 1 августа 2008 г. Оба затмения можно будет наблюдать в Горно-Алтайске. (Это фантастически редкое событие, тем более что в Горно-Алтайске можно будет наблюдать частные солнечные затмения в 2009, 2010, 2011 и 2012 гг.) Следующие полные солнечные затмения можно увидеть только в 2036 и 2063 гг. Причем за это время пройдет больше трех саросов, т. е. произойдет более 30 полных солнечных затмений.

Сводка затмений Солнца и Луны, которые можно будет наблюдать в России в 2002—2010 гг., дана в Приложении.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Что такое небесная сфера? Опишите главные линии и круги на ней.

2. Что такое системы координат? Почему их несколько и какие из них основные? Как следует ориентировать системы координат (какие)?

3. Найдите высоту Солнца в Киеве ($\varphi=50{,}5^\circ$) 5 мая ($\delta=5^\circ$) в полдень и определите продолжительность дня в тот же день.

4. Опишите суточное движение Солнца в зависимости от времени года для южного и северного полушарий.

5. Что такое звездное и солнечное время? Почему вводятся разные виды солнечного времени? По какому времени идут наши часы?

6. Что такое солнечное затмение? Когда оно происходит и каковы условия его наступления? Как часто оно наступает?

7. Что такое лунное затмение? Когда оно происходит и каковы условия его наступления? Как часто оно наступает?

8. Определите высоту Солнца над горизонтом в полдень дня летнего солнцестояния ($\delta=23{,}5^\circ$) на экваторе и во Владивостоке ($\varphi=43{,}1^\circ$).

9. Сегодня произошло полное солнечное затмение, причем в этот момент Солнце было 5° от узла лунной орбиты. Когда произойдут ближайшие лунное и солнечное затмения. Какими они будут?

Глава III

МИР ТЯГОТЕНИЯ

§ 8. ЗАДАЧА ДВУХ ТЕЛ. ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

1. Основная задача небесной механики. Основная задача небесной механики заключается в расчете движения небесных тел под действием сил всемирного тяготения. В эту задачу включают исследование и расчет движения планет, искусственных спутников Земли (ИСЗ), космических аппаратов, звезд в двойных и кратных системах, строения галактик. В число задач небесной механики включают и учет приливных сил, возникающих вследствие неоднородности поля тяготения.

Все эти задачи в математическом смысле исключительно трудны. Большинство из них решается численными методами с использованием самых мощных ЭВМ. Но есть и задачи, которые могут быть решены в аналитическом виде.

2. Задача двух тел. Законы Кеплера. В простейшем случае рассматривается задача о движении в системе, состоящей из двух тел, — задача двух тел. При этом считается, что система отсчета связана с телом большей массы. Тогда, как установил И. Ньютон, движение другого тела подчиняется трем законам Кеплера.

Первый закон Кеплера

Планета движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

Эта формулировка принадлежит Кеплеру. Ньютон обобщает ее: во-первых, может рассматриваться система звезда — звезда (двойная звезда), планета — спутник; во-вторых, меньшее тело может двигаться по параболе или гиперболе (рис. 33).

Эллипс (см. рис. 33) — вытянутая окружность, обладающая тем свойством, что существуют две точки (фокусы эллипса F_1 и F_2, для которых выполняется условие: сумма расстояний фокусов от любой точки эллипса постоянна ($F_1C+F_2C=F_1E+F_2E=\text{const}$), т. е. не зависит от точки, выбранной на эллипсе).

Отрезок AB называется большой осью, соответственно отрезок $AO=OB$ — большой полуосью (принятое обозначение a), отрезки CD и OC — малой осью и полуосью b. Размер эллипса определяется большой полуосью, форма — эксцентриситетом $e=\sqrt{1-b^2/a^2}$. При $e=0$ эллипс вырождается в окружность, при $e=1$ — в параболу, при $e>1$ — в гиперболу, которую лучше представлять в виде графика функции $y=1/x$, повернутого на 45°. У эллипса большая полуось $a>0$, у параболы $a=\infty$, у гиперболы $a<0$, что, конечно, только математическая абстракция.

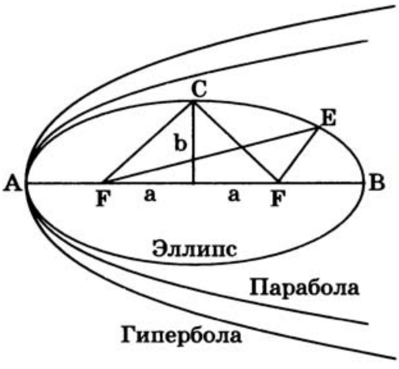


Рис. 33. Возможные орбиты в задаче двух тел.

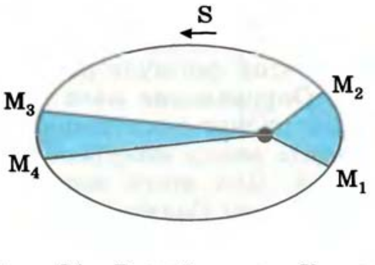


Рис. 34. Второй закон Кеплера (расстояния $M_1\ M_2$ и $M_3\ M_4$ планета проходит за одинаковое время, выделенные сектора имеют одинаковые площади).

Второй закон Кеплера

Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади (рис. 34).

Это утверждение аналогично тому, что скорость движения уменьшается по мере удаления от Солнца, а точнее, это закон сохранения момента импульса.

Момент импульса ($K = mvr$) — физическая величина, удобная для описания движения точки по окружности или эллипсу, параболе, гиперболе, а также для описания вращения твердого тела. Закон сохранения момента импульса (как и законы сохранения импульса и энергии) — один из трех основополагающих законов природы. Согласно теореме Нётер этот закон является следствием изотропности (равноправия всех направлений) Вселенной.

Если подсчитать число суток от дня весеннего равноденствия (21 марта) до дня осеннего (23 сентября) и от 23 сентября до 21 марта следующего года, то окажется, что первый период на 7 сут. длиннее второго. Другими словами, Земля зимой движется быстрее, чем летом, следовательно, она зимой ближе к Солнцу. Самую близкую к Солнцу точку своей орбиты — перигелий — Земля проходит 6 января.

Третий закон Кеплера

Отношение куба большой полуоси планетной орбиты к кубу периода обращения планеты вокруг Солнца равно сумме масс Солнца и планеты (в формулировке Ньютона):

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M + m),$$

где M и m — массы тел системы; a и T — большая полуось и период обращения меньшего тела (планеты, спутника); G — гравитационная постоянная.

Обратим внимание на постоянный множитель в правой части. В формуле он приводится в единицах СИ, но в астрономии используются астрономическая единица длины (вместо метра), год (вместо секунды) и масса Солнца (вместо килограмма). Тогда, как легко убедиться, если пренебречь массой планеты по отношению к массе Солнца, постоянный множитель в этой формуле равен единице.

3. Определение масс небесных тел. Третий закон Кеплера предоставляет единственную возможность непосредственно определить массу небесного тела. Для примера определим массу Солнца. Для этого запишем третий закон Кеплера сначала для системы Солнце — Земля, а затем для системы Земля — Луна:

$$\frac{a_{\oplus}^3}{T_{\oplus}^2} = GM_{\odot}, \quad \frac{a_{☾}^3}{T_{☾}^2} = GM_{\oplus}. \qquad (2)$$

(Обозначения ⊙, ⊕ и ☾ относятся соответственно к Солнцу, Земле и Луне.)

Массами Земли по отношению к Солнцу и Луны по отношению к Земле пренебрегаем, поскольку масса Солнца намного больше массы Земли, которая, в свою очередь, намного больше массы Луны.

Поделив теперь первое выражение на второе, получим

$$M_\odot = M_\oplus \left(\frac{a_\oplus}{a_\leftmoon}\right)^3 \left(\frac{T_\leftmoon}{T_\oplus}\right)^2.$$

Подставив сюда значения больших полуосей орбит Земли и Луны (150 000 000 и 384 000 км) и их периодов обращения (365,24 и 27,5 сут.), получим, что масса Солнца в 330 000 раз превышает массу Земли ($6 \cdot 10^{24}$ кг), т. е. равна $2 \cdot 10^{30}$ кг.

§ 9. ВОЗМУЩЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ. ВОЗМУЩАЮЩИЕ СИЛЫ. ПРИЛИВЫ

1. Задача многих тел. Задача двух тел имеет лишь ограниченное применение. В большинстве случаев система содержит несколько тел: например, в Солнечную систему входят Солнце и 9 больших планет (влияние остальных тел Солнечной системы пренебрежимо мало). Доказано, что получить решение этой задачи в виде алгебраических формул, позволяющих точно рассчитать положения и скорости всех тел системы в любой момент времени, в принципе невозможно. Решение такой задачи находится приближенными методами как результат трудоемких расчетов на современных ЭВМ. Однако в ряде случаев задача допускает существенные упрощения.

Одно из интереснейших решений было найдено Лагранжем для так называемой ограниченной задачи трех тел. В ней рассматривается движение системы трех тел: масса первого намного больше массы второго, а масса третьего намного меньше массы второго. В этом случае второе тело движется по кеплеровой орбите, а третье тело находится в одной из точек Лагранжа. Расположение этих точек ясно из рисунка 35. Три точки расположены на одной прямой, две — в вершинах равностороннего треугольника. Точки L_1, L_2, L_3 неустойчивые. Тело, попавшее в одну из таких точек, быстро уходит из нее под действием притяжения других планет. Точки L_4, L_5, напротив, устойчивы. Тело, попавшее в них, при малых отклонениях от точки стремится вернуться.

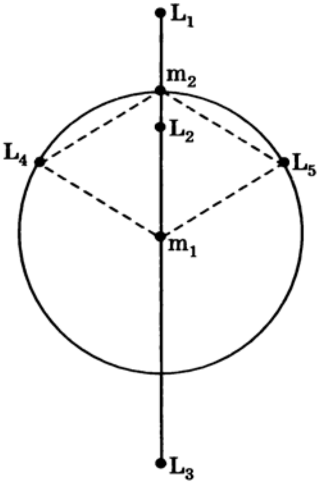


Рис. 35. Точки Лагранжа.

В природе такая задача реализуется у так называемых «троянцев». Это две группы небольших астероидов, которые движутся по орбите Юпитера в его точках Лагранжа. Группа получила свое название потому, что все ее тела носят имена героев Троянской войны. Не исключено, что в будущем в точках Лагранжа в системе Земля — Луна будут расположены ретрансляционные станции, обеспечивающие постоянную связь Земли и лунных станций.

2. Возмущенное движение. В Солнечной системе совокупная масса всех планет в 700 раз меньше массы Солнца. Естественно, что сила притяжения планет намного меньше силы притяжения Солнца. В случае Земли, например, сила притяжения Юпитера (самой большой планеты) составляет 0,00006 от силы притяжения Солнца. Поэтому в первом приближении можно ограничиться учетом только притяжения Солнца и считать, что планеты движутся по законам Кеплера. Рассчитанное таким образом движение называется кеплеровым.

Во втором приближении учитываются силы притяжения планет. Поскольку эти силы невелики, их учитывают отдельно, т. е. сначала рассчитывают отклонение от кеплеровой орбиты (его называют возмущением), вызванное одной из планет, затем другой и т. д. Вычисленные возмущения складывают и получают возмущенное движение.

В связи с развитием межпланетных полетов стало необходимым рассчитывать движение планет с точностью, большей, чем дает метод возмущений. Были разработаны новые методы расчетов, основанные на применении мощных ЭВМ. В наше время теория планетных систем достигла такого совершенства, что при расчете движения планет Солнечной системы допускается ошибка не более нескольких километров.

3. Открытие Нептуна и Плутона. После открытия Урана астрономы рассчитывали его движение с учетом возмущений от всех известных в то время планет. Но уже к середине XIX в. стало ясно, что учитываемые возмущения не могут объяснить отклонения от кеплеровой орбиты. Были предприняты попытки рассчитать положение гипотетической планеты, притяжение которой могло бы объяснить эти отклонения. Для таких расчетов нужно было ввести предположения о возможной орбите планеты, ее расстоянии от Солнца, ее массе. Сделанные предположения оказались удачными, и новая планета была открыта недалеко от предсказанного места в первую же ночь наблюдений.

Но вскоре оказалось, что и с помощью Нептуна (так была названа новая планета) невозможно объяснить все неправильности движения Урана. Были предприняты расчеты положения еще одной планеты, но они оказались не столь удачными, и на поиски ее понадобилось около 30 лет.

Последняя, девятая планета была открыта только в 1930 г.

Помимо не очень удачных предсказаний, касающихся ее орбиты и массы, она оказалась очень тусклой, и для ее обнаружения понадобился мощный телескоп. В настоящее время еще нельзя сказать, решает ли открытие Плутона (девятой планеты) все проблемы с движением Урана и Нептуна.

4. Невидимые спутники звезд. Обычно вычисления ведутся в системе отсчета, в которой центральное тело (обладающее большей массой) считается неподвижным. Если выполнять расчеты в системе, связанной с центром масс, оба тела системы описывают эллипсы, большие полуоси которых обратно пропорциональны массам тел. Если меньшее тело по своей малости недоступно наблюдениям, то внешний наблюдатель увидит, что наблюдаемое тело (звезда, планета) движется не прямолинейно, а по сложной кривой. Такой характер движения свидетельствует о наличии ненаблюдаемых объектов, положение которых может быть рассчитано. Использование этого метода позволило открыть спутник Сириуса и множество тесных двойных систем.

В двойной системе лучевая скорость главной звезды периодически меняется. Сравнительно недавно удалось повысить точность определения лучевых скоростей до ±3 м/с, что дало возможность открыть существование ряда (уже более 100) планетных систем. Мы еще вернемся к этому вопросу.

5. Прецессия. Явление прецессии (см. § 4, п. 1) также легко объясняется силами тяготения. Если Земля была бы точным шаром, то никакой прецессии возникнуть не могло бы. Однако Земля несколько сплюснута у полюсов. Это позволяет представить Землю как шар с небольшими утолщениями на экваторе. Шар притягивается Луной и Солнцем как материальная точка, расположенная в его центре.

Силы, с которыми Луна притягивает эти утолщения, образуют пару сил, стремящихся повернуть ось вращения Земли и сделать ее перпендикулярной плоскости лунной орбиты (при-

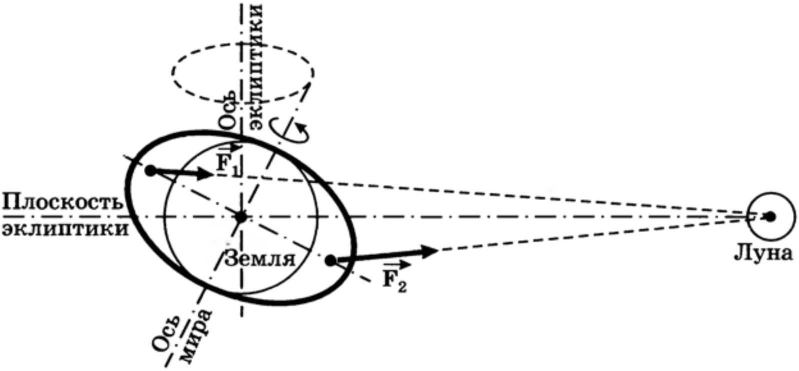


Рис. 36. Прецессия земной оси.

тяжение Луны) и эклиптики (притяжение Солнца; рис. 36). Однако Земля вращается, и такое воздействие приводит к тому, что ось вращения (SN на рисунке 36) начинает описывать конус. Это и есть прецессия.

6. Приливы. Дважды в сутки в морях и океанах происходит подъем и спад воды. Это явление морских приливов. Уже в древности наблюдатели заметили, что прилив наступает через некоторое время после кульминации Луны в месте наблюдения. Более того, приливы наиболее сильны в дни ново- и полнолуний, когда центры Луны и Солнца располагаются примерно на одной прямой.

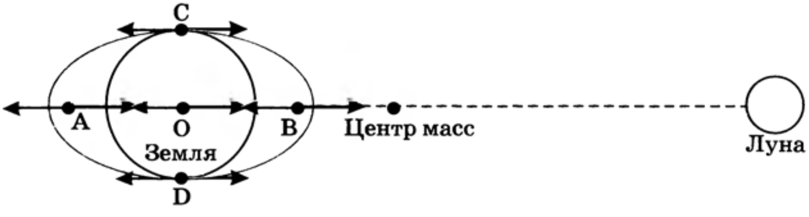
Учитывая это, И. Ньютон объяснил приливы действием тяготения со стороны Луны и Солнца, а именно тем, что разные части Земли притягиваются Луной по-разному. Рассмотрим, следуя Ньютону, более подробно приливы, вызываемые притяжением Луны, так как воздействие Солнца существенно (в 2,2 раза) меньше.

Запишем выражения для ускорений, вызываемых притяжением Луны для разных точек Земли, учитывая, что для всех тел в данной точке пространства эти ускорения одинаковы. В инерциальной системе отсчета, связанной с центром масс системы, значения ускорений будут:

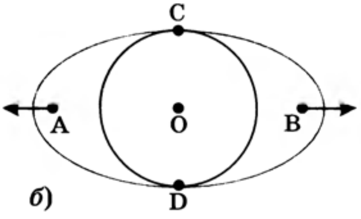
$$a_A = -\frac{GM}{(R-r)^2},\ a_B = -\frac{GM}{(R+r)^2},\ a_O = -\frac{GM}{R^2},$$

где a_A, a_O, a_B — ускорения, вызванные притяжением Луны в точках A, O, B (рис. 37); M — масса Луны; r — радиус Земли; R — расстояние между центрами Земли и Луны (для расчетов его можно принять равным $60r$).

Но мы живем на Земле и все наблюдения проводим в системе отсчета, связанной с центром Земли, а не с центром масс Земля — Луна. Чтобы перейти в эту систему, нам необходи-



а)



б)

Рис. 37. Ускорения точек на Земле, вызванные притяжением Луны: *а* — в системе отсчета, связанной с центром масс системы Земля — Луна; *б* — в системе отсчета, связанной с центром Земли.

мо из всех ускорений вычесть ускорение центра Земли. Тогда

$$a'_A = -\frac{GM_{\leftmoon}}{(R-r)^2} + \frac{GM_{\leftmoon}}{R^2},\ a'_B = -\frac{GM_{\leftmoon}}{(R+r)^2} + \frac{GM}{R^2}.$$

Выполним действия в скобках и учтем, что r мало по сравнению с R и в суммах и разностях им можно пренебречь. Тогда

$$a'_A = -\frac{GM}{(R-r)^2} + \frac{GM_{\leftmoon}}{R^2} = \frac{GM_{\leftmoon}(-2Rr+r^2)}{R^2(R-r)^2} = -\frac{2GM_{\leftmoon}r}{R^3}.$$

Ускорения a'_A и a'_B одинаковы по модулю, противоположны по направлению, каждое направлено от центра Земли. Они называются *приливными ускорениями*. В точках C и D приливные ускорения, меньшие по модулю и направленные к центру Земли.

Приливными ускорениями называются ускорения, возникающие в системе отсчета, связанной с телом из-за того, что вследствие конечных размеров этого тела разные его части по-разному притягиваются возмущающим телом. В точках A и B ускорение силы тяжести оказывается меньшим, чем в точках C и D (см. рис. 37). Следовательно, для того чтобы давление на одинаковой глубине было одинаковым (как у сообщающихся сосудов) в этих точках, вода должна подняться, образуя так называемый приливный горб. Подсчет показывает, что подъем воды или прилив в открытом океане составляет около 40 см. В прибрежных водах он гораздо больше, а рекорд составляет около 16 м. Ньютоновская теория этого объяснить не может.

В действительности картина более сложная, чем та, которую мы рассмотрели выше. Дело в том, что Земля вращается вокруг своей оси намного быстрее, чем Луна обращается вокруг Земли. В результате приливный горб (взаимное расположение Земли и Луны показано на рисунке 38) движется, по Земле бежит приливная волна, возникают приливные течения. При приближении к берегу высота волны увеличивается, поскольку поднимается дно. В благоприятно расположенных узких заливах высота прилива возрастает еще в несколько раз.

Трение воды о дно, а также деформации твердой оболочки Земли сопровождаются выделением тепла, что приводит к рассеянию энергии системы Земля — Луна. Поскольку приливный горб относится к востоку, максимальный прилив происходит после кульми-

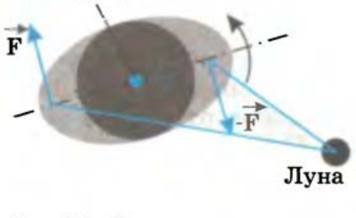


Рис. 38. Замедление вращения Земли.

нации Луны, притяжение горба вызывает ускорение Луны и замедление вращения Земли. Луна постепенно отодвигается от Земли. Действительно, геологические данные показывают, что в юрском периоде (190—130 млн лет назад) приливы были намного выше, а сутки — короче. Отметим, что при уменьшении расстояния до Луны в 2 раза высота прилива возрастает в 8 раз. В настоящее время сутки увеличиваются на 0,00017 с в год. Так что примерно через 1,5 млрд лет их длина увеличится до 40 современных суток. Такой же длины будет и месяц. В результате Земля и Луна будут всегда обращены друг к другу одной и той же стороной. После этого Луна начнет постепенно приближаться к Земле и еще через 2—3 млрд лет будет разорвана приливными силами (если, конечно, к тому времени Солнечная система еще будет существовать).

7. Приливные силы на ИСЗ и космических аппаратах. Искусственные спутники Земли (ИСЗ) и космические аппараты (КА) движутся под действием только гравитационных сил. Поскольку их ускорения равны гравитационным, в них возникает состояние невесомости.

Но ИСЗ не представляют собой точечных объектов, а поле, в котором они движутся, не однородное. Поэтому на ИСЗ возникают приливные силы.

С одной стороны, именно приливные силы обеспечивают те микроускорения, которые мешают добиться на ИСЗ полной невесомости. С другой стороны, в ряде задач именно приливные силы позволяют найти приемлемое решение. Так, для многих ИСЗ требуется сохранять определенную ориентацию относительно Земли. Например, метеорологические спутники ведут непрерывную съемку облачного покрова Земли. Естественно, что объективы аппаратуры ИСЗ должны быть непрерывно направлены на Землю. Приливное ускорение (см. § 9, п. 5) равно:

$$a_{\text{пр}}=\frac{2GM_{\oplus}l}{(R+h)^3}=2g\frac{l}{R},$$

где $a_{\text{пр}}$ — приливное ускорение; $M_{\oplus}$ и R — масса и радиус Земли; h — высота спутника; l — отклонение данной точки от центра тяжести ИС вдоль линии, соединяющей центр Земли и центр тяжести ИС; g — ускорение силы тяжести (из-за малости h и l можно считать, что это ускорение силы тяжести на поверхности Земли). Приливное ускорение всегда направлено от центра тяжести ИС.

Пусть на достаточно большом ИСЗ (орбитальной станции) на расстоянии 3 м от его центра тяжести находится незакрепленный предмет. Так как спутник совершает свободный полет (находится в состоянии невесомости), то движение предмета относительно спутника определяется только микроускорениями, созданными приливными силами. Подставляя в вышеприведенную формулу известные данные ($l=3$ м, $g=9{,}81$ м/с^2, $R=6{,}378\cdot10^6$ м), получим, что приливное ускорение составит 10^{-5} м/с^2. Но даже при таком, казалось бы, ничтожном ускорении через 8 мин предмет окажется в 2 м от своего первоначального положения.

Такая ориентация достигается использованием приливных сил. Поместим на длинных и легких штангах небольшие грузы (рис. 39). Приливные силы, действующие на эти грузы, будут разворачивать ИСЗ так, чтобы штанги расположились вдоль радиуса Земли. Тем самым будет обеспечена нужная ориентация ИСЗ.

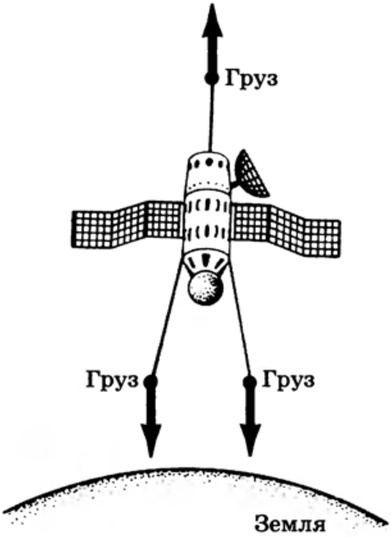


Рис. 39. ИСЗ, стабилизируемый приливными силами.

§ 10. ДИНАМИКА КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

1. Законы сохранения энергии и законы Кеплера. Рассмотрим систему, состоящую из двух тел A и B с массами соответственно M и m, причем для определенности примем, что $M \gg m$ и система отсчета связана с большим телом, т. е. будем считать, что именно это тело неподвижно (рис. 40).

Найдем потенциальную энергию такой системы тел. При перемещении тела m из точки R_1 в точку R_2 будет совершена работа, равная:

$$A_{1,2}=\frac{GMm}{R_{\text{ср}}^2}(R_2-R_1).$$

Существует два средних значения: среднее арифметическое и среднее геометрическое. При малой разности обеих величин различие между средними оказывается намного меньшим, чем различие между величинами. Поэтому мы можем заменить $R_{\text{ср}}^2$ на произведение R_1R_2. Тогда

$$A_{1,2}=\frac{GMm}{R_2}-\frac{GMm}{R_1}.$$

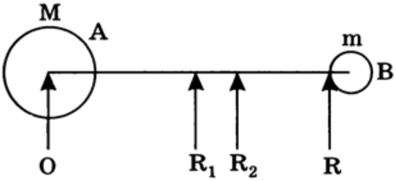


Рис. 40. К вычислению потенциальной энергии системы.

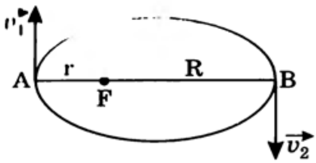


Рис. 41. К определению полной энергии системы.

Поскольку работа есть разность потенциальных энергий, взятая с обратным знаком, ясно, что

$$E_{\text{П}} = -\frac{GMm}{R}.$$

Найдем теперь значение полной энергии системы. Для этого зафиксируем равенство полной энергии в точках эллипса A и B (рис. 41):

$$\frac{mv_A^2}{2} - \frac{GMm}{r} = \frac{mv_B^2}{2} - \frac{GMm}{R} \tag{1}$$

и равенство моментов импульса в этих точках:

$$v_A r = v_B R. \tag{2}$$

(Обозначения ясны из рисунка 41, если допустить, что Солнце находится в левом фокусе эллипса.)

С помощью уравнения (2) исключим из уравнения (1) v_B и перепишем получившееся уравнение в виде

$$\left(\frac{mv_A^2}{2} - \frac{GMm}{r}\right)R^2 + GMR - \frac{mv_A^2 r^2}{2} = 0.$$

Очевидно, что R является корнем этого трехчлена. Прямой подстановкой убеждаемся, что r также является корнем этого трехчлена. По теореме Виета получаем

$$2a = (R + r) = GMm\Big/\left(\frac{mv_A^2}{2} - \frac{GMm}{r}\right) = GMm/E_{\text{пол}} \text{ и } E_{\text{пол}} = -\frac{GMm}{2a},$$

т. е. закон сохранения энергии может быть записан в виде

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{GMm}{r} = -\frac{GMm}{2a}, \tag{3}$$

где a — большая полуось орбиты, а r — расстояние от большего тела.

Согласно закону сохранения энергии полная энергия системы есть величина постоянная. Отсюда следует вывод, что скорость v зависит только от радиус-вектора r. В противном случае E не может быть постоянной величиной. Таким образом, в задаче остается только одна произвольная постоянная — полная энергия. Она задается значением скорости в произвольной точке орбиты (т. е. для определенного значения r).

После этого возможно определение скорости в любой точке орбиты по формуле полной энергии. Поскольку v задается произвольным образом (исходя из условий данной конкретной задачи), ясно, что полная энергия может иметь любой знак, т. е. она может быть отрицательной, положительной и равной нулю. Рассмотрим все три случая.

1. $E_{\text{пол}} < 0$. В этом случае из формулы (3) получаем

$$r = \frac{GM}{|E_{\text{пол}}| + \dfrac{v^2}{2}} < \frac{GM}{|E_{\text{пол}}|},$$

т. е. тела, составляющие систему, не могут удалиться друг от друга на расстояние большее, чем $r=\frac{GM}{|E_{\text{пол}}|}$. Причем этот предел завышен. Если полная энергия тела отрицательна, то орбитой меньшего тела является эллипс.

Система с отрицательной полной энергией называется гравитационно-связанной.

Особый интерес представляет движение меньшего тела системы по круговой орбите. В данном случае имеет место соотношение

$$v_1=\sqrt{\frac{GM}{R}},$$

где R — радиус, или большая полуось, орбиты; v_1 — первая космическая скорость.

Отсюда следует, что в случае кругового движения кинетическая энергия в 2 раза меньше по модулю потенциальной. Поэтому

$$2E_{\text{к}}+E_{\text{п}}=0.$$

Это соотношение называется *теоремой вириала.*

2. $E_{\text{пол}}>0$. В этом случае из формулы (3) получаем $a<0$.

В этом случае расстояние между телами никак не ограничено. Тела могут сходиться и расходиться на любое расстояние. Орбитой меньшего тела будет гипербола.

Система с положительной полной энергией называется гравитационно-связанной.

3. Особый интерес представляет случай $E_{\text{пол}}=0$. В этом случае скорость тела равна:

$$v_1=\sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

Эта скорость называется второй космической скоростью на расстоянии r. Меньшее тело при этом движется по параболе. Из этого следует, что гравитационно-несвязанная система не может самопроизвольно превратиться в систему гравитационно-связанную, т. е. *захват другого тела в рамках задачи двух тел невозможен.* Это положение очень важно, когда рассматривается возможность образования системы Земля — Луна путем захвата Луны.

Строгий математический анализ задачи двух тел, проведенный еще Ньютоном, показал, что движение тел в гравитационно-связанной системе подчиняется законам, которые были установлены Кеплером в применении к Солнечной системе и которые носят его имя. Решение задачи двух тел, получаемое из закона всемирного тяготения Ньютона, позволяет найти значения постоянных величин, которые входят в математические соотношения, выражающие эти законы. Приведем современную формулировку первого закона Кеплера.

Первый закон Кеплера

В гравитационно-связанной системе тело B движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится тело A. Эксцентриситет эллипса определяется численным значением полной энергии системы. В гравитационно-несвязанной системе тело B движется по параболе ($E=0$) или по гиперболе ($E>0$), в фокусах которых находится тело A.

Формулировки второго и третьего законов не меняются.

2. Интеграл энергии. Как только прекращают работу двигатели ракетоносителя, движение космического аппарата (в дальнейшем: космический аппарат — КА, искусственный спутник — ИС, искусственный спутник Земли — ИСЗ) определяется исключительно полем тяготения, в котором он движется. Движение его описывается законами Кеплера.

Перепишем теперь выражение для полной энергии (см. формулу (3):

$$v^2=GM\left(\frac{2}{r}-\frac{1}{a}\right),$$

где a — большая полуось орбиты; M — масса центрального тела (масса спутника пренебрежима мала); r — радиус-вектор спутника в данный момент времени; v — модуль его скорости (опять же в данный момент времени). Эта формула называется *интегралом энергии.* Она применима как к движению по эллипсу ($a>0$), параболе ($a=\infty$), так и к движению по гиперболе ($a<0$).

3. Искусственные спутники Земли. Движение ИСЗ происходит по эллиптической (в частном случае круговой) орбите. Плоскость орбиты стремится сохранить свое положение в пространстве относительно звезд. Так как Земля вращается, то при каждом следующем витке спутник проходит над другой областью Земли, и траектория проекции спутника на ее поверхность (имеется в виду путь точки, которая находится все время точно под спутником на поверхности Земли) представляет собой довольно сложную спираль.

Точка орбиты спутника, наиболее приближенная к Земле, называется перигеем, наиболее удаленная — апогеем. Большая полуось орбиты ИСЗ определяется выражением

$$a=R+(h_п+h_а)/2,$$

где $h_п$ и $h_а$ — высоты перигея и апогея; R — радиус Земли.

Перигей орбиты ИСЗ выбирается не ниже 200 км, так как на более низких орбитах время существования спутника слишком мало (из-за сопротивления воздуха). Период обращения спутника вычисляется по третьему закону Кеплера, который мы перепишем в виде

$$T=2\pi\sqrt{\frac{a^3}{GM}}.$$

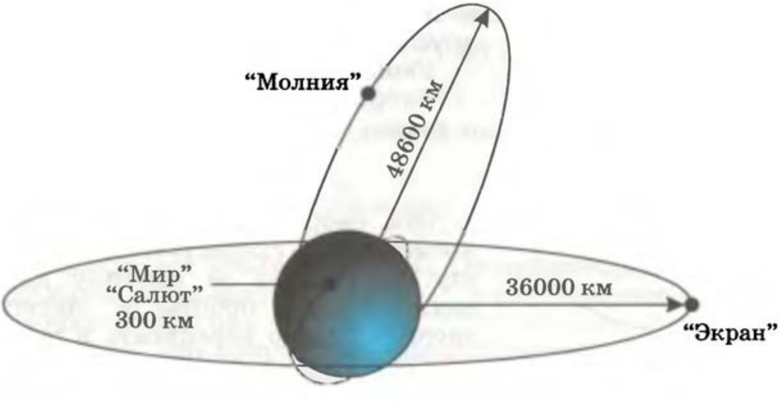


Рис. 42. Орбиты ИСЗ различного назначения.

Подставив в это выражение численные значения постоянных величин, получим

$$T = 0{,}83\sqrt{12\ 376 + (h_п + h_а)}.$$

Высоты должны быть выражены в километрах, период — в минутах.

Из этой формулы видно, что период обращения ИСЗ по круговой орбите определяется ее высотой. На высоте 35 942 км он становится равным 24 ч. Если при этом орбита спутника лежит в плоскости экватора, то он висит над одной и той же точкой земной поверхности. Такие спутники называются стационарными. Они удобны для организации связи и передачи телепрограмм на больших расстояниях (рис. 42, спутник «Экран»).

Но на значительной части территории России стационарный спутник виден на слишком малой угловой высоте над горизонтом, что затрудняет прием сигналов с него (в районах севернее 80° с.ш. стационарный спутник вообще не виден). Для обслуживания этих районов спутники запускаются на сильно вытянутые орбиты. Так, у ИСЗ «Молния» высота перигея около 500 км, а апогея около 50 000 км, при этом апогей орбиты расположен над северной полярной областью. По второму закону Кеплера бóльшую часть времени такой ИСЗ будет проводить около апогея, т. е. хорошо наблюдаться именно там, где стационарный спутник не виден.

4. Перевод спутника с орбиты на орбиту. Рассмотрим задачу перевода ИС с одной круговой орбиты на другую. Ограничение случаем круговых орбит диктуется необходимостью некоторого упрощения задачи.

Задача

Требуется перевести ИС, летящий по орбите радиусом (или большой полуосью, что для круговой орбиты, очевидно, одно и то же), равным a_1, на орбиту радиусом a_2 (рис. 43).

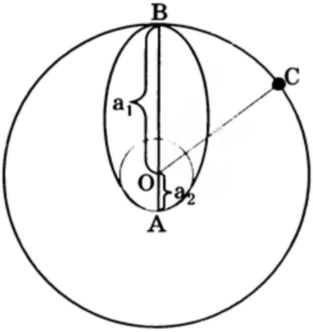


Рис. 43. Перевод спутника с одной орбиты на другую.

Решение

Скорость ИС на орбите радиусом a равна:

$$v_1=\sqrt{\frac{GM}{a}}.$$

Эта скорость называется первой космической скоростью на расстоянии a. Приняв за единицу длины радиус первой орбиты a_1, интеграл энергии можно переписать в виде

$$v^2=v_1^2\left(\frac{2}{r}-\frac{1}{a}\right),$$

где v_1 — первая космическая скорость на расстоянии a_1. В интересующих нас случаях (перелет с одной орбиты ИСЗ на другую и перелет с Земли на другую планету) за a_1 принимают значение радиуса Земли, или радиуса земной орбиты. В первом случае v_1=8 км/с, во втором v_1=30 км/с.

Для перехода на орбиту радиусом a_2 нужно перевести ИС на промежуточную орбиту, представляющую собой эллипс, касающийся как нижней, так и верхней орбиты (см. рис. 43). Большая полуось этого эллипса равна $a_{\text{пр}}=\frac{a_1+a_2}{2}$.

На промежуточной орбите (точка A на рисунке 43) в перигее спутник должен иметь скорость:

$$v_{\text{пр}}^2=v_1^2\left(\frac{2a_2}{a_2+a_1}\right).$$

Так как $v_{\text{пр}}>v_1$, то для перехода на промежуточную орбиту нужно увеличить скорость ИС.

В точке B (см. рис. 43) скорость ИС, летящего по промежуточной орбите, меньше, чем первая космическая скорость на этом расстоянии:

$$v^2{}_{\text{прв}}=v_2^2\left(\frac{2a_1}{a_2+a_1}\right).$$

Поэтому для окончательного перехода на новую орбиту скорость спутника должна быть еще раз увеличена.

Если стоит задача не просто перевести ИС с орбиты на орбиту, а провести стыковку с другим ИС (спутником-мишенью), то запуск должен производиться в строго определенное время, чтобы оба спутника подошли к точке B (см. рис. 43) одновременно. Для этого спутник-мишень в момент начала перевода должен находиться в точке C. Для определения дуги CB воспользуемся третьим законом Кеплера.

Поскольку период обращения спутника-мишени (летящего по орбите радиусом a_2) равен $T_2=1{,}65\cdot10^{-4}\sqrt{a_2^3}$, а время перелета равно половине периода для промежуточной орбиты $t=\frac{1}{2}T_{\text{пр}}=0{,}83\cdot10^{-4}\sqrt{a_{\text{пр}}^3}$, то длина дуги BC находится по формуле

$$\alpha=360^\circ\frac{T_{\text{пр}}}{T_2}=180^\circ\sqrt{\frac{1}{8}\left(1+\frac{a_1}{a_2}\right)},$$

что и определяет время старта ИС. Он производится в момент, когда спутник находится в точке A, а спутник-мишень проходит точку C (см. рис. 43).

Очевидно, что полученные формулы непосредственно применяются к расчетам полетов к Луне (КА сначала выводится на низкую круговую орбиту) и к другим планетам (этап вывода рассмотрим позже).

5. Межпланетные перелеты. Схема межпланетного перелета аналогична схеме перевода ИС с орбиты на орбиту со стыковкой со спутником-мишенью. Для определенности рассмотрим расчет полета с Земли (⊕) на Марс (♂).

Прирост скорости для перехода на промежуточную орбиту в этом случае равен:

$$\Delta v=v_{\text{пр}}-v_1=v_1\left(\sqrt{\frac{2a_{\text{пр}}}{a_{♂}+a_{\oplus}}}-1\right).$$

Подставив в эту формулу значения $v_1=30$ км/с, $a_{\oplus}=1$, $a_{♂}=1{,}52$, получим $\Delta v=2{,}9$ км/с.

Определим скорость, с которой космический аппарат должен стартовать с Земли. Пусть его стартовая скорость будет v, а кинетическая энергия соответственно $E=mv^2/2$.

Часть кинетической энергии идет на увеличение общей энергии системы с целью освобождения КА, т. е. на перевод гравитационно-связанной системы Земля — ракета в гравитационно-несвязанную. Это соответствует энергии тела, движущегося со второй космической скоростью, равной 11,2 км/с. Очевидно, что в момент старта ракета должна развить скорость, равную:

$$v_{\text{ст}}=\sqrt{(11{,}2)^2+(\Delta v)^2}=11{,}6\ \text{км/с}.$$

Время перелета определяется по третьему закону Кеплера.

Конечно, так можно только грубо оценить условия полета. Расчет полета КА основан на предположении, что он стартует с наименьшей возможной скоростью, т. е. с наименьшей затратой энергии. Однако такой запуск требует выполнения ряда условий с очень большой, часто недостижимой точностью. Поэтому запуск производится с несколько большей скоростью, что сильно сокращает время перелета, уменьшает требуемую точность и расширяет период, когда запуск возможен.

6. Прошлое, настоящее и будущее космических полетов. Межзвездные путешествия. Космическая эра началась совсем недавно. Еще не прошло полувека с того знаменательного дня, когда в нашей стране было создано и запущено первое искусственное небесное тело — первый искусственный спутник Земли. Только 40 лет минуло с тех пор, когда впервые человек увидел нашу Землю извне, и немного больше 30 лет после того, как первый человек ступил на поверхность другого небесного тела. Но счет искусственных спутников уже идет на тысячи, а запусков межпланетных станций — на десятки.

Налицо громадный прогресс. Космические аппараты позволили развить метеорологию, значительно улучшилось качество прогнозов погоды. Появились совершенно новые — спутниковые средства связи, космические навигационные системы.

Хорошо изучены ближайшие планеты: Венера и Марс, космические аппараты исследовали Юпитер, Сатурн. Осуществлена первая посадка на астероид, планируются посадки космических аппаратов на кометы. Перечислить все научные результаты просто нет никакой возможности. Не меньшие результаты получены от внедрения новых технологий, разработанных в космическом ракетостроении.

Но уже намечается предел: новые научные задания требуют новых расходов, часто превышающих возможности человечества. Построена новая международная космическая станция «Альфа». Она прослужит еще много лет, но уже сейчас видно, что многие исследования нужно проводить на малых спутниках, где приливные силы пренебрежимо малы. Можно с уверенностью сказать, что станция «Альфа», несомненно, принесет множество важных результатов и открытий, но станция «Бета» появится очень нескоро, и придет она на смену «Альфе», а не в дополнение к ней.

Очень часто говорится о подготовке экспедиции на Марс. Нельзя сказать, что эта задача относится к актуальным. Однако большинство задач по изучению планеты может разрешить только человек. Но для полета *на Марс*, а не *к Марсу* нужно убедиться со стопроцентной уверенностью, что на нем нет жизни. А если такой уверенности нет, то стоит вспомнить кроликов, завезенных в Австралию, колорадского жука, завезенного в Европу, рапану, завезенную в Черное море, чуму, завезенную в Средние века в Европу, и многие подобные случаи. А ведь это наша, земная жизнь, и другие местные формы жизни могут успешно с ней бороться. А как марсианская жизнь будет взаимодействовать с жизнью земной? Этого никто не знает, и опасность невероятно высока.

Очень и очень многие популярные сейчас проекты никогда не будут осуществлены. Например, добыча полезных ископаемых на Луне. Не говоря уже о том, что этот проект невероятно дорог, нужно сначала подумать: а есть ли на Луне вообще месторождения полезных ископаемых? Если учесть, что практически все месторождения на Земле образовывались при прямом или косвенном участии воды, а на Луне воды не было никогда, то ответ на вопрос об осуществимости этого проекта становится ясен.

Никогда не будут осуществлены и межзвездные путешествия. Они требуют таких невероятных затрат энергии, что человечество никогда не сможет пойти на них. Да и время, которое понадобится для полета к звезде, в котором можно поставить сколько-нибудь интересные научные задачи, исчисляется столетиями.

Однако не стоит отчаиваться. Человечество уже доказало, что оно может ставить перед собой и решать невероятно интересные и важные задачи, о которых, пока они не поставлены, люди даже не задумываются.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Сформулируйте законы Кеплера и укажите, какие законы природы они отражают.

2. Что такое возмущенное движение!

3. Опишите решение Лагранжа.

4. Чем объясняется прецессия!

5. Чем вызваны приливы! Почему прилив бывает 2 раза в сутки!

6. Почему максимальные приливы бывают в полно- и новолуние!

7. На каком расстоянии от Юпитера космический корабль, выведенный на круговую орбиту, будет иметь период в 3 раза меньше синодического месяца (земного)!

8. АМС отправлена к Луне по орбите с минимальной скоростью. Определите скорость ракеты относительно Луны в момент встречи.

9. Определите, с какой скоростью нужно направить АМС с околоземной орбиты к Луне, чтобы встреча АМС с Луной произошла с минимальной скоростью. Принять, что в момент встречи векторы скорости параллельны.

10. Определите расстояние до двойной звезды, если период обращения ее равен 125 годам, а большая полуось видна под углом 0,25″. Массы звезд нам неизвестны, поэтому сделайте о них разумное предположение.

Глава IV

МИР ПЛАНЕТ

§ 11. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Солнечная система состоит из Солнца, 9 больших планет с их спутниками, более 100 000 малых планет, или астероидов, огромного числа комет (по некоторым данным, их более

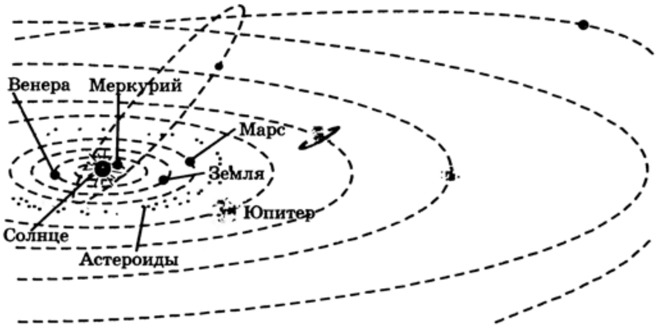


Рис. 44. Схема строения Солнечной системы.

100 млрд), бесчисленного количества мелких метеорных тел, межпланетной пыли и газа (рис. 44). Происхождение, эволюция, законы движения всех тел, входящих в Солнечную систему, полностью определяются центральным телом — Солнцем. Точно определить границу Солнечной системы невозможно, но многие исследователи проводят ее на расстоянии 100 тыс. а. е. от Солнца.

Основная масса вещества Солнечной системы (исключая само Солнце) содержится в девяти больших планетах. Все они движутся по орбитам, близким к кеплеровым, плоскости которых наклонены к плоскости солнечного экватора под небольшими углами, за исключением орбит Меркурия (7°) и Плутона (19°). Вращение Солнца вокруг своей оси и обращение планет вокруг него происходят в одном направлении. Расстояния между орбитами планет закономерно возрастают по мере удаления от Солнца.

Орбиты Меркурия и Плутона отличаются от орбит других планет большими наклонами к эклиптике и большими эксцентриситетами. Что касается Плутона, то он предположительно является не большой планетой, а самым крупным астероидом из внешнего астероидного пояса (пояса Койпера). Для Меркурия положение иное. Сейчас получила широкое распространение идея о том, что Меркурий был когда-то спутником Венеры.

Эта гипотеза родилась в конце XIX в. К гипотезе не относились серьезно до тех пор, пока первые полеты космических аппаратов к Меркурию не выявили ряд особенностей его внутреннего строения, которые трудно объяснить предположением, что Меркурий сформировался на своей орбите, как и другие планеты. Более того, точные расчеты процесса формирования планет привели к заключению, что Меркурий вообще не мог образоваться там, где он сейчас находится. Были проведены соответствующие расчеты и сделаны предположения, что Меркурий образовался как спутник Венеры на орбите с большой полуосью около 400 000 км (большая полуось орбиты Луны — 385 000 км). Большая масса Меркурия обусловила значительно бо́льшие приливные эффекты, чем в системе Земля — Луна. Это обеспечило быстрое замедление вращения и Венеры, и Меркурия и быстрый разогрев их недр. Приливное воздействие Земли на систему Венера — Меркурий привело, в частности, к тому, что когда Венера находится в нижнем соединении (т. е. между Солнцем и Землей), она всегда повернута к Земле одной и той же стороной. Это приводит к увеличению полной энергии системы Венера — Меркурий и ее распаду. Меркурий становится самостоятельной планетой.

Малые планеты, или астероиды, имеют диаметр от 1 до 1000 км. Их общая масса, несмотря на огромное их число, не превышает 1/100 массы Земли. Орбиты большинства астероидов расположены между орбитами Марса и Юпитера, образуя пояс астероидов (рис. 45). Орбиты некоторых из них сильно вытянуты. Так, астероид Гидальго удаляется от Солнца за пределы орбиты Сатурна, а Икар заходит внутрь орбиты Меркурия. Некоторые астероиды могут сближаться с Землей. Например, в 1976 г. Икар приблизился к Земле на расстояние всего 7 млн км. Хотя есть сообщения, что некоторые небольшие астероиды заходили внутрь орбиты Луны, столкновение Земли с астероидом настолько маловероятно, что происходит раз в несколько сотен миллионов лет. В настоящее время неизвестно ни одного астероида, столкновение с которым может произойти в сколько-нибудь обозримое время.

Кроме известного с начала XIX в. пояса астероидов между Марсом и Юпитером, на краю Солнечной системы за орбитой Нептуна находится еще один пояс астероидов — пояс Койпера. Обнаружение этих астероидов чрезвычайно сложная задача. Они очень далеки от Солнца и очень слабы. Тем не менее уже открыто более 100 объектов пояса Койпера. По мнению многих исследователей, Плутон является самым большим представителем этого семейства астероидов.

Еще дальше, в пределах 100 000 а. е., расположено Облако Оорта, которое иногда называют банком комет. Сами будущие кометы представляют собой глыбы «грязного», т. е. с включениями твердых частиц, водяного, водородного и углеводородного снега. Это остатки того материала, из которого образовались планеты. Время от времени в результате столкновений между собой или под действием возмущений со стороны ближайших звезд отдельные глыбы изменяют свое движение

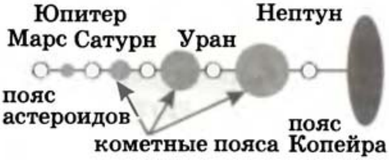


Рис. 45. Строение астероидных поясов.

и попадают в центральные области Солнечной системы. Если этим телам придется «встретиться» с Нептуном, Ураном, Сатурном или Юпитером, они могут быть выброшены в область внутренних планет. Так возникают кометы.

Орбиты комет отличаются разнообразием. Как правило, они очень сильно вытянуты (иногда практически неотличимы от параболических). Не исключено, что эти кометы покидают Солнечную систему. В то же время не обнаружено ни одной кометы, орбита которой была бы гиперболической, т. е. такой, которая заведомо пришла бы к нам из другой планетной системы. Встречаются также кометы, орбиты которых близки к круговым (например, комета Швассмана — Вахмана движется между орбитами Марса и Юпитера). Среди комет встречаются объекты, движущиеся по орбите в направлении, обратном движению планет (в том числе известная комета Галлея).

Метеорные тела (размером от долей миллиметра до километра в диаметре) и межпланетная пыль (частички, размер которых не превышает сотни микрометров) заполняют практически все пространство Солнечной системы. Метеорные тела и пыль образуются при распаде комет, при столкновениях астероидов между собой, а также между кометами и мелкими телами. Мелкие метеорные тела и пылинки недолговечны. Световое давление и солнечный ветер* оказывают на них тормозящее действие, и они медленно падают на Солнце. На расстоянии в несколько радиусов Солнца метеорные тела нагреваются до тысячи кельвин и испаряются. Для больших метеоритов этот процесс практически незаметен. Для пылинки размером в доли миллиметра он продолжается столетия, а частички размером в несколько микрометров просто «выметаются» давлением света из пределов Солнечной системы.

§ 12. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ ГРУППЫ ЗЕМЛИ

Изучение конкретных тел, входящих в состав Солнечной системы, начнем с больших планет. По своим характеристикам (размерам, массам, скорости вращения вокруг оси, химическому составу планет и их атмосфер) они делятся на две большие группы: группу планет типа Земли и группу Юпитера (они же планеты-гиганты). Эти группы как бы разделены поясом астероидов.

К первой группе (группе Земли) относятся четыре ближайшие к Солнцу планеты — Меркурий, Венера, Земля и

---

*Солнечный ветер — поток частиц, испаряющихся с поверхности Солнца (подробнее см. § 22).

Марс, а также Луна, которая хотя и является спутником Земли, но ее характеристики близки к характеристикам планет этой группы.

Все планеты группы Земли обладают сравнительно небольшими массами и размерами, но их плотность достаточно велика: она лежит в пределах от $3{,}5 \cdot 10^3$ до $5{,}5 \cdot 10^3$ кг/м^3. Планеты этой группы либо полностью (Луна, Меркурий) лишены атмосферы, либо имеют малопротяженную и не очень плотную атмосферу, масса которой составляет лишь ничтожную долю массы планеты. Основным химическим соединением в этих атмосферах является углекислый газ (Венера, первичная атмосфера Земли, Марс). Современный состав атмосферы Земли обусловлен жизнедеятельностью зеленых растений.

Все планеты этой группы обладают сходным строением, различия объясняются разной массой планет (см. вклейку I). Лучше всего исследовано строение Земли. По современным данным в центре планеты располагается внутреннее ядро (субъядро) радиусом около 1300 км. Вещество в субъядре находится в твердом состоянии, его температура около 4500 К, давление в нем $3 \cdot 10^{14}$ Па, плотность около $12 \cdot 10^3$ кг/м^3. Относительно химического состава субъядра единого мнения в науке нет: по одним теориям он совпадает с химическим составом верхних слоев Земли, по другим внутреннее ядро состоит из железа с примесью серы и никеля. Внутреннее ядро окружено жидкой оболочкой толщиной около 2100 км. Внутреннее ядро и оболочка составляют ядро Земли. Выше ядра расположена мантия толщиной около 2900 км, а еще выше — кора, имеющая толщину около 48 км под океаном и 40—80 км под материками. У Меркурия нет внутреннего ядра (температура и давление в центре планеты недостаточны для его образования), ядро невелико. О внутреннем строении других планет этой группы известно немного. По-видимому, оно промежуточное между строением Земли и Меркурия. Только у двух планет этой группы есть естественные спутники: у Земли — один (Луна), у Марса — два (Фобос и Деймос). При этом строение Луны близко к строению Меркурия, а Фобос и Деймос представляют собой крошечные небесные тела.

Планеты этой группы хорошо изучены, в частности, с помощью космических аппаратов. Поэтому каждая планета и Луна будут изучаться в отдельном параграфе.

§ 13. ФИЗИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ПЛАНЕТ ГРУППЫ ЮПИТЕРА

Основное отличие планет группы Юпитера от планет группы Земли — их существенно большие массы и размеры (их часто называют «планеты-гиганты»). В то же время плотности планет этой группы значительно меньше плотностей планет земной группы. Это говорит о различии химического состава планет обеих групп. Все планеты группы Юпитера обладают мощными атмосферами, в их спектрах хорошо видны полосы поглощения метана и аммиака. Однако основными компонентами атмосфер этих планет являются водород и гелий. Отсутствие линий поглощения этих элементов объясняется тем, что при условиях, царящих в атмосферах планет-гигантов, они видны только в далекой ультрафиолетовой области спектра, недоступной для наблюдений с Земли. Легкообнаруживаемые аммиак и метан составляют в действительности не более 0,1% массы атмосферы планет-гигантов.

Все планеты этой группы вращаются значительно быстрее планет группы Земли. Причем у них отмечается интересная закономерность. Период вращения экваториальных областей значительно меньше периода вращения вблизи полюсов. Такой закон вращения наблюдается и у Солнца. По-видимому, он характерен для газообразных тел. Поэтому следует ожидать, что если у этих планет и есть твердые ядра, то они невелики по сравнению с их мощными атмосферами.

Если среди планет группы Земли только сама Земля обладает значительным магнитным полем, то для планет группы Юпитера характерны очень сильные, намного более сильные, чем у Земли, магнитные поля. Это связано с более быстрым вращением этих планет.

У всех планет группы Юпитера есть спутники, число их может доходить до нескольких десятков. Кроме того, они обладают системами колец. Кольца Сатурна (см. вклейку III) видны даже в школьный телескоп. Они были открыты еще в XVII в. голландцем X. Гюйгенсом. Кольца Юпитера были открыты при полете КА «Пионер» в начале 70-х гг. XX в. После этого тончайшими наземными наблюдениями были обнаружены кольца у Урана и Нептуна. Их существование было подтверждено в полете КА «Вояджер».

Четкое разделение планет на две группы является важным экспериментальным фактом, который обязательно должен быть объяснен современной теорией происхождения и эволюции Солнечной системы (см. § 35).

§ 14. ЛУНА

Более детальное изучение планет мы начинаем с нашего естественного спутника — Луны. Она типичнейший представитель планет земной группы, ближайшее к нам и наиболее изученное (наблюдения с Земли, АМС, экспедиции) небесное тело. Луна обращается вокруг Земли по эллиптической орбите со средним расстоянием 384 000 км.

Периоды ее вращения вокруг оси и обращения вокруг Земли строго совпадают, вследствие этого Луна обращена к Земле всегда одной и той же видимой стороной. Та сторона, которая никогда не видна с Земли, называется обратной. Обе стороны значительно отличаются друг от друга (см. вклейку I), впрочем, не больше, чем океаническое и материковое полушария Земли. Если на Луну смотреть невооруженным глазом, то она видна как небольшой (угловой диаметр 0,5°) серебристый диск.

В действительности Луна очень темное тело: она отражает только 7,3% падающего на него света. Цвет ее поверхности, как свидетельствуют астронавты, сильно зависит от условий освещенности, но в основном он темно-коричневый, иногда с зеленоватым оттенком. Цветовые контрасты на Луне очень слабы. Поверхность Луны делится на участки светлые — материки, темные — моря. Последние и образуют рисунок человеческого лица, который мы различаем в полнолуние. В лунных морях никогда не было воды, они представляют собой огромные впадины глубиной до 3 км, дно которых покрыто темной лавой. Моря занимают около 40% площади видимой стороны. На обратной стороне Луны морей практически нет (только небольшие моря — Море Мечты и Море Москвы), но есть подобные морям понижения, не покрытые лавой. Названия «материки» и «моря», данные Г. Галилеем, до сих пор применяются к светлым и темным пятнам, которые мы видим на поверхности других планет группы Земли.

Наиболее характерной деталью лунного рельефа являются кольцевые горы — кратеры (см. вклейку I и рис. 46). Различие между кратерами и цирками в том, что у цирков нет центральной горки. Кратеров на Луне очень много: только на видимой стороне и только кратеров с диаметром более 3,5 км насчитывается около 17 000. На обратной стороне число кратеров значительно больше. С уменьшением диаметра их число быстро возрастает. Кратеры в основном расположены на материке. В морях их меньше, кроме того, многие из них залиты лавой. Все крупные детали рельефа Луны получили собственные имена и названия (см. вклейку I). Большинство их было дано в XVII в. польским астрономом Я. Гевелием. Для морей он выбрал произвольные названия (Море Ясности, Океан Бурь и др.), кратерам дал имена крупнейших ученых (Птолемей, Коперник, Аристарх и др.), горным цепям — назва-

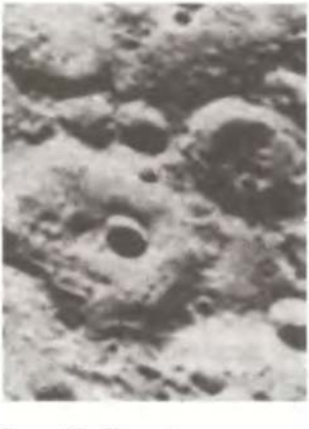


Рис. 46. Кратеры и цирки.

ния земных гор (Апеннины, Альпы, Кавказ). Эти названия утвердились, и только в 1972 г. к ним добавилось новое: место прилунения первой лунной экспедиции было названо Морем Познанным.

На правах первооткрывателей ученые СССР дали названия объектам обратной стороны Луны. Моря были названы Морем Москвы и Морем Мечты, кратеры получили имена крупнейших ученых и космонавтов (Циолковский, Ферми, Королев, Гагарин и др.).

Луна полностью лишена атмосферы, и на ее поверхности наблюдается колоссальный перепад температур. Грунт Луны обладает исключительно малой теплопроводностью; поэтому он быстро нагревается лучами Солнца до температуры около 120 °С, но стоит зайти Солнцу или данному участку поверхности попасть в тень, как температура стремительно падает до −180 °С. Из-за отсутствия атмосферы поверхность Луны подвергается непрерывной метеоритной бомбардировке. Ведь даже самые маленькие метеориты, масса которых измеряется долями грамма и миллиграммами, достигают поверхности Луны (на Земле они сгорают в верхних слоях атмосферы) и врезаются в нее со скоростью не менее 2 км/с. Кроме того, поверхность Луны подвергается непрерывным воздействиям солнечного ультрафиолетового, рентгеновского и корпускулярного излучений. Эти воздействия приводят к раздроблению горных пород и образованию реголита — грунта, не имеющего земных аналогов.

Результаты исследования образцов, доставленных на Землю, показали, что реголит состоит из спекшихся микроскопических обломков горных пород. В нем были найдены хорошо известные минералы вроде полевого шпата, образовавшиеся в условиях полного отсутствия свободной воды. Новых минералов обнаружено очень мало. Химический анализ реголита также не дал ничего сенсационного. Реголит отличается от земных пород главным образом очень малым количеством связанной воды.

Как показало определение возраста лунных пород, современный облик Луны сформировался 3,5 млрд лет назад. Когда заканчивалось образование планет, на их поверхности выпадало очень большое количество метеоритов и астероидов, в том числе и огромных. Сталкиваясь с поверхностью образующейся планеты, они взрывались и образовывали гигантские воронки, которые отождествляются с современными лунными кратерами. Самые большие, диаметром в десятки километров, пробивали кору и вызывали истечение огромного количества лавы. Так образовывались лунные моря. Сила тяжести на Луне невелика, поэтому упавшие астероиды (или их остатки) частично сохранились под ее поверхностью, образуя масконы. Вещество масконов имеет бóльшую плотность, чем окружающее вещество лунной коры. Они искажают гравитационное поле Луны, что проявляется в движении пролетающих над ними искусственных спутников Луны.

Интенсивная бомбардировка поверхности Луны закончилась, но метеориты продолжали падать. Но большие, могущие образовать кратер тела падают теперь на Луну чрезвычайно редко. За все время телескопических наблюдений образовалось всего два или три новых небольших кратера, да и то полной уверенности в этом нет.

Аналогичные процессы происходили, очевидно, и на других планетах, в том числе и на Земле. Но на Земле воздух и вода сглаживают следы страшных катастроф, и к настоящему времени геологи нашли только несколько «звездных ран» на поверхности нашей планеты. Так, Гудзонов залив в Северной Америке является следом падения несколько миллионов лет назад небольшого астероида.

Благодаря АМС и экспедициям стало возможно изучение Луны геологическими и геофизическими методами. Основной вывод заключается в том, что Луна застыла на той стадии эволюции, которую Земля проходила около 3,5 млрд лет назад. Следы этой стадии на Земле были стерты бурными геологическими процессами, которые на Луне (из-за ее малой массы) давно прекратились. Именно то, что Луна позволяет нам изучить ранние стадии эволюции планет земной группы, делает ее исследование столь важным.

§ 15. МЕРКУРИЙ

Как и другие планеты, Меркурий представляется земному наблюдателю яркой звездой, светящейся спокойным светом, периодически появляющейся к западу или востоку от Солнца. Поскольку он никогда не удаляется от Солнца более чем на 28°, наблюдать его довольно трудно. Меркурий обращается вокруг Солнца за 88 земных суток, а период вращения вокруг оси составляет точно 2/3 этой величины, т. е. Меркурий за два года делает три оборота вокруг своей оси.

Орбита Меркурия сильно вытянута (рис. 47), поэтому в перигелии (наименьшее расстояние от Солнца) планета движется намного быстрее, чем в афелии (наибольшее расстояние от Солнца). Приводит это к замечательному эффекту. На долготах 0° и 180° в течение одних суток можно на-

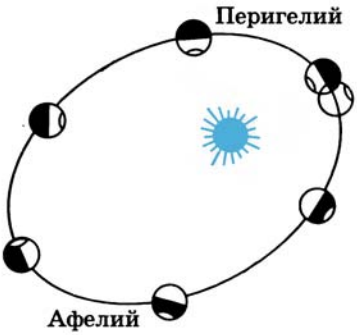


Рис. 47. Движение Меркурия по орбите за 1,5 оборота.

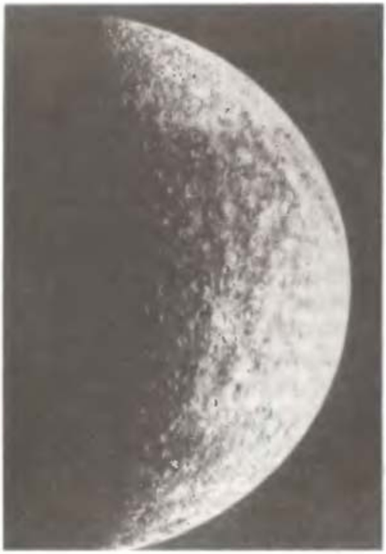


Рис. 48. Меркурий.

блюдать три восхода и три захода Солнца. Правда, это бывает только тогда, когда Меркурий проходит перигелий и только на указанных долготах.

Меркурий — ближайшая к Солнцу планета (его расстояние от Солнца в 2,5 раза меньше, чем от Земли), что определяет своеобразность физических условий на его поверхности. Внешне он очень похож на Луну (рис. 48). Его поверхность также усеяна кратерами, есть море, наблюдаются и другие характерные для Луны формы рельефа. В полуденной точке, т. е. там, где Солнце стоит в зените, температура достигает 750 К (450 °С), а к полуночи падает до 80—90 К (−180 °С). Еще более интенсивная бомбардировка поверхности, обусловленная близостью к Солнцу, определяет сходство лунного и меркурианского реголитов. Меркурий, как и Луна, лишен атмосферы, что обусловлено его малой массой.

Известно, что температура характеризует среднюю кинетическую энергию, или среднюю скорость, хаотического движения молекул газа. Но в газе всегда имеются молекулы, скорость которых как меньше, так и больше и даже много больше средней скорости. Молекула, скорость которой равна или больше второй космической скорости, покидает планету. Столкновения молекул газа приводят к тому, что доля молекул, которые могут покинуть планету, остается все время постоянной (она определяется температурой газа). Таким образом, атмосфера любой планеты рассеивается в пространстве, и рано или поздно любая планета лишается своей атмосферы. Темп этого процесса зависит от отношения второй космической скорости к средней скорости молекул. Если это отношение равно десяти, то для рассеяния атмосферы понадобятся десятки миллиардов лет, если четырем, то сотни миллионов, если двум, то несколько часов. Расчеты показывают, что ни у Луны, ни у Меркурия атмосфера не могла сохраниться.

Тем не менее атмосфера у Меркурия существует! Правда, она совсем не похожа на земную. Прежде всего она крайне разрежена. Ее давление в $5 \cdot 10^{11}$ раз меньше, чем на поверхности Земли. Атмосфера Меркурия подобна текущей реке. Она непрерывно пополняется за счет захвата атомов солнечного ветра и непрерывно рассеивается. В среднем каждый атом гелия удерживается у поверхности Меркурия в течение 200 дней. Число атомов во всей атмосфере на 1 см^2 поверхности планеты не более $4 \cdot 10^{14}$ (на Земле — 10^{25}) атомов гелия и в 30 раз меньше атомов водорода. Отметим, что современная техника не способна достичь такого вакуума.

§ 16. ВЕНЕРА

Либо незадолго до восхода на востоке, либо после захода Солнца на западе можно увидеть очень яркую звезду. Люди с очень острым зрением могут заметить, что эта «звезда» иногда выглядит крошечным лунным серпом. Это планета Венера.

Венера по своим физическим характеристикам во всем подобна Земле (см. Приложение II). Она имеет практически те же массу и радиус, а также атмосферу, открытую еще М. В. Ломоносовым. Сплошной слой облаков Венеры обусловливает ее исключительную яркость и скрывает от нас ее поверхность. Только развитие радиоастрономических исследований, завершившихся построением радиокарты Венеры (атмосфера практически прозрачна для радиоволн), и осуществление ряда полетов АМС, увенчавшихся посадками на планету и передачей изображений ее поверхности (рис. 49), позволили достаточно полно исследовать нашу небесную соседку.

Полеты АМС серии «Венера», спуск и посадка аппаратов на поверхность планеты позволили точно определить химический состав атмосферы и поверхностных слоев, температуру и

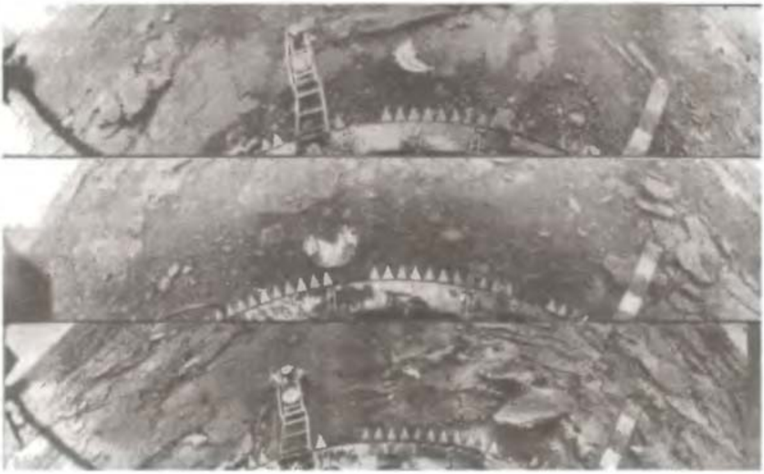


Рис. 49. Поверхность Венеры по снимкам АМС.

давление на поверхности Венеры. Оказалось, что ее атмосфера состоит практически из чистого (97%) углекислого газа с небольшой примесью азота (≈3%), кислорода и водяного пара (менее 0,1%). Температура около 750 К (480 °С), она практически не зависит ни от времени суток, ни от широты места. Давление на поверхности в 90 раз превышает давление земной атмосферы на уровне моря.

Почему же две похожие планеты обладают разными атмосферами? Первоначальные атмосферы Венеры, Земли и Марса были близки по своему химическому составу, но на Венере было меньше воды, так как она формировалась ближе к Солнцу. По той же причине температура на ее поверхности изначально была выше. Кроме того, вращение Венеры очень быстро затормозилось (сейчас период обращения Венеры вокруг своей оси равен 243,16 земных суток, при этом она вращается в сторону, противоположную движению планеты вокруг Солнца), поэтому на Венере не появилось магнитное поле. Большое количество воды на Земле привело к раннему появлению океанов и развитию на ней жизни. Углекислый газ растворяется в океане, и слабая кислота, которая при этом возникает, связывается горными породами. Кроме того, некоторые живые существа поглощают углекислый газ. Растения разлагают его, выделяя кислород, а углерод связывается в виде залежей угля и углеродсодержащих пород. Основная часть поглощенного углерода идет на создание раковин и известковых скелетов простейших организмов, образующих известняки. В них углерода в 100 000 раз больше, чем в современной атмосфере Земли.

Большое значение имеет отсутствие магнитного поля на Венере. В верхних слоях атмосферы ультрафиолетовое излучение Солнца расщепляет молекулу воды на ион водорода (H^+) и ион гидроксила (OH^-). Тепловая скорость иона водорода в 4,5 раза больше скорости молекулы воды. Он свободно покидает Венеру. Так Венера очень быстро потеряла весь свой водород, а следовательно, и воду. Кислород же связан горными породами. Весь выделившийся из недр углекислый газ остался в атмосфере. Иное положение на Земле, имеющей достаточно сильное магнитное поле. Ион (заряженная частица) не может двигаться поперек магнитных силовых линий, а следовательно, не может покинуть Землю. Темп потери водорода резко замедлен, и вода на Земле сохранилась.

Углекислый газ практически прозрачен для видимого света, но очень сильно поглощает инфракрасное излучение. Поэтому атмосфера Венеры играет роль своеобразного «одеяла». Свет Солнца свободно достигает поверхности планеты и нагревает ее. В свою очередь, нагретая поверхность отдает энергию в виде инфракрасного излучения, которое поглощается атмосферой и нагревает ее. Это явление называется парниковым эффектом, оно аналогично наблюдаемому в парниках и теплицах, где роль атмосферы играет стеклянная крыша. Подробно мы рассмотрим этот эффект в главе V при обсуждении вопроса о распространении процесса передачи энергии в веществе.

При наблюдениях с Земли представляется, что Венера закрыта плотным слоем облаков, аналогичных земным. Наблюдения на поверхности Венеры показывают, что это, скорее, дымка тумана, состоящего из капелек серной кислоты. Похожий, но во много раз более тонкий слой был обнаружен и в атмосфере Земли на высоте 25—30 км. Только в атмосферном слое Земли сами капельки в 10 раз меньше, а число их в единице объема в 100 раз меньше, чем на Венере. Наличие в атмосфере большого количества серной кислоты и фиксируемые АМС вспышки молний говорят о том, что на Венере должны быть действующие вулканы.

Радиолокационные наблюдения установили 243-суточный период вращения Венеры, однако снимки, сделанные с космических аппаратов в ультрафиолетовых лучах (см. рис. 48), показали всего четырехсуточный период. Эта загадка была решена блестящими экспериментами, проведенными АМС «Вега-1» и «Вега-2», с бортов которых были запущены аэростаты. За их движением следили с Земли с помощью радиотехнических средств. Наблюдения показали, что в атмосфере Венеры на больших высотах дуют широтные ветры со скоростями более 100 м/с. Такие ветры объясняют четырехсуточный период вращения верхних слоев атмосферы. Кроме того, были обнаружены вертикальные хаотические движения со скоростями до нескольких метров и даже до нескольких десятков метров в секунду. Все это дает чрезвычайно важный материал для развития теории процессов, происходящих в атмосфере Земли.

С точки зрения геологии изучение Венеры очень важно. Земля и Венера обладают приблизительно одинаковыми размерами и массами, образовались вроде бы в одной области Солнечной системы. Между тем по многим параметрам планеты различны. Не говоря уже об атмосферах (причины различия которых более-менее понятны), есть различия во внутреннем и геологическом строении планет. Поверхность Венеры характеризуется равнинными районами, горами и низменностями. Горные районы вполне можно называть материками. К ним относятся: земля Иштар вблизи Северного полюса, земля Афродиты в южном полушарии и область Бета. Горные районы на Венере занимают всего 7% поверхности планеты. Тектоника Венеры изучена слабо, тем более что все изучение основывается только на формах рельефа. О сейсмических исследованиях говорить не приходится. Даже существование активных вулканов, хотя в этом никто не сомневается, основано только на косвенных данных. Различия же в тектонике очень сильные; в частности, на Венере не обнаружена тектоника плит. О природе ряда объектов пока можно только догадываться.

§ 17. МАРС

Марс — четвертая планета Солнечной системы, расположенная примерно в 1,5 раза дальше от Солнца, чем Земля. Земному наблюдателю он виден как яркая звезда красного цвета. Год на Марсе продолжается 687 земных или 667 марсианских суток (сутки на Марсе на 37 мин длиннее земных). Плоскость экватора Марса наклонена к плоскости орбиты на 25° (у Земли на 23°27′), поэтому на Марсе происходит смена времен года, аналогичная земной, только продолжительность каждого времени года там вдвое больше, чем на Земле.

Поскольку Марс находится дальше от Солнца, чем Земля, он может занимать на небе положение, противоположное Солнцу, тогда он виден всю ночь. Такое положение планеты называется противостоянием. У Марса оно повторяется каждые два года и два месяца. Так как орбита Марса вытянута больше земной, то во время противостояний расстояния между Марсом и Землей могут быть различными. Раз в 15 или 17 лет происходит Великое противостояние, когда расстояние между Землей и Марсом минимально и составляет 55 млн км.

По своим размерам и массе Марс занимает промежуточное положение между Землей и Луной: его радиус примерно в 2 раза, а масса в 9 раз меньше земных. Атмосфера Марса очень разрежена, бóльшая ее часть уже рассеялась, из-за отсутствия магнитного поля потеряна и почти вся вода. Атмосфера Марса состоит в основном из углекислого газа с примесью азота (2,5%) и аргона (1,52%). Атмосферное давление около 6 гПа, оно сильно зависит от высоты места и не превышает 12 гПа.

На фотографии Марса, сделанной с космического телескопа Хаббла, хорошо видны характерные особенности планеты. На красном фоне марсианских пустынь отчетливо видны голубовато-зеленые моря и ярко-белая полярная шапка (см. вклейку II). Знаменитых каналов на снимке не видно. При таком увеличении они действительно не видны. После того как были получены крупномасштабные снимки Марса, загадка марсианских каналов была окончательно разрешена: каналы представляют собой оптическую иллюзию.

Поверхность Марса напоминает пустыни Земли (см. вклейку II). Красный цвет марсианских песков обусловлен большим количеством окислов железа. Размер песчинок очень мал — всего 1—50 мкм. Такие песчинки даже в сверхразреженной атмосфере Марса могут подниматься на высоту в несколько километров и парить в воздухе долгое время. Этим объясняются пылевые бури на Марсе. Они бывают настолько сильными, что поднятая ветрами пыль образует гигантские пылевые облака, закрывающие многокилометровым слоем практически всю поверхность планеты.

Это не противоречит тому, что другие наблюдения показывают, что частицы, образующие пески, имеют размеры до 1 мм. Просто мельчайшие частицы под действием электрических сил слипаются в весьма рыхлые образования, которые легко разрушаются ветром.

Как выяснилось, и сами моря Марса, и их сезонные изменения вызваны сильными сезонными ветрами, темный цвет морей обусловлен длинными рядами барханов или дюн. Температура на поверхности Марса в среднем ниже 0 °C. Только в отдельные моменты на экваторе она может подниматься до +23 °C, но к полуночи она понижается до −90 °C, зимой на полюсах — до −125 °C, тогда из атмосферы выпадает снег в виде замерзшей углекислоты («сухой лед»). Большой интерес вызывает вопрос о наличии воды на Марсе. В жидком виде вода на его поверхности существовать не может (слишком низкое давление и низкая температура), но определенное количество воды может сохраняться в слоях вечной мерзлоты. По-видимому, полярные шапки Марса содержат очень большое количество водяного льда. При падении больших метеоритов лед плавится и вода выливается на поверхность. Так интерпретируется ряд снимков, полученных с искусственных спутников Марса.

Обнаружение русел высохших рек (рис. 50) на снимках Марса дает возможность предполагать, что в прошлом на Марсе были периоды более теплого климата. Тогда в атмосферу поступало большое количество водяного пара, что приводило к парниковому эффекту и увеличению давления атмосферы до 100, а может быть, и до 1000 гПа. В пользу этого предполо-

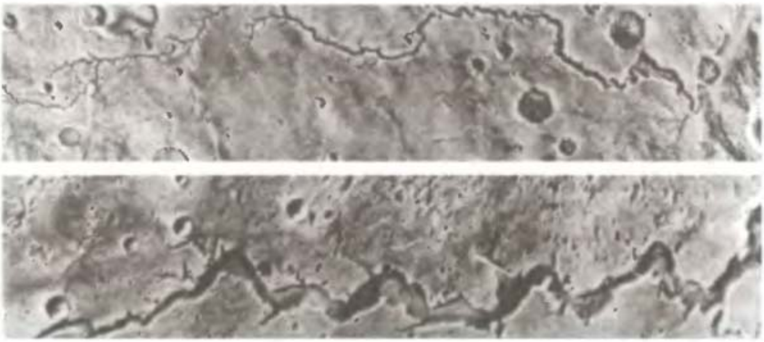


Рис. 50. Русла высохших рек на Марсе.

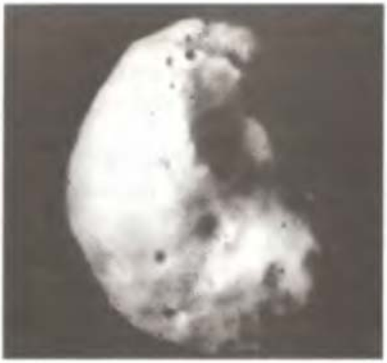


Рис. 51. Фобос.

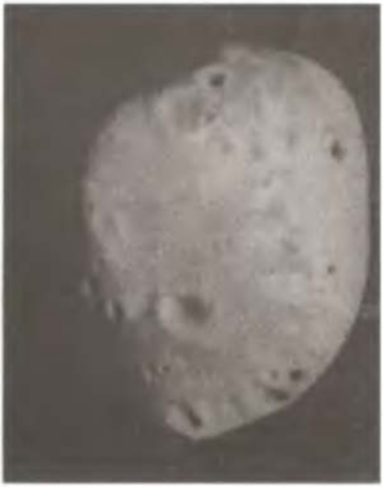


Рис. 52. Деймос.

жения говорит и обнаружение на Марсе множества форм рельефа, которые образованы текущей водой.

Большой интерес вызывал вопрос о возможности существования жизни на Марсе. Проведенные в 1976 г. на американских АМС «Викинг» исследования дали, по-видимому, окончательный отрицательный результат. Никаких следов жизни на Марсе не обнаружено. Поверхность Марса напоминает лунную. Она усеяна кратерами, полностью подобными лунным, но носящими следы атмосферной эрозии (см. вклейку II).

Как и другие планеты, на ранней стадии своего существования Марс подвергался метеоритной бомбардировке, но в формировании его поверхности значительную роль играли внутренние тектонические силы. Об этом, в частности, свидетельствует самый большой в Солнечной системе вулкан Олимп, диаметр которого у основания более 500 км, а высота 27,5 км. Помимо гор и вулканов, на Марсе обнаружен гигантский разлом — каньон Маринера глубиной 5—6 км, шириной от нескольких десятков километров до 200 км и длиной 3600 км, тянущийся вдоль экватора. Аналогичные разломы на Земле вызваны действием тектонических сил, которые разорвали древний единый материк Земли — Пангею, а в наше время вызывают движение материков.

У Марса есть два небольших спутника — Фобос (рис. 51) и Деймос (рис. 52). Их размеры 18×22 и 10×16 км соответственно. Фобос расположен от поверхности планеты на расстоянии всего 6000 км и обращается вокруг нее примерно за 7 ч, что в 3 раза меньше марсианских суток. Деймос находится на расстоянии 20 000 км.

Со спутниками связан ряд загадок. Так, неясно их происхождение. Большинство ученых считают, что это сравнительно недавно захваченные астероиды. Трудно представить себе, как уцелел Фобос после удара метеорита, оставившего на нем кратер диаметром 8 км. Непонятно, почему Фобос является самым черным из известных нам тел. Его отражательная способность в 3 раза меньше, чем сажи. К сожалению, несколько полетов КА к Фобосу закончилось неудачей. Окончательное решение многих вопросов как Фобоса, так и Марса откладывается до экспедиции на Марс, планируемой на начало XXI в.

Планеты группы Земли исследованы в настоящее время довольно хорошо благодаря космическим полетам АМС и экспедициям на Луну. Полученные данные имеют большое значение для одной из самых «земных» наук — геологии.

§ 18. ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ

1. Атмосферы планет-гигантов. В группу планет-гигантов входят Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун. Последняя планета Солнечной системы — Плутон — относится, скорее всего, к телам, составляющим пояс Койпера, он самое крупное тело этой группы.

Юпитер и Сатурн наблюдаются невооруженным глазом, причем Юпитер уступает по блеску только Венере. Уран и Нептун видны в небольшие телескопы, для наблюдения Плутона необходим мощный телескоп.

Исследование планет-гигантов затрудняется тем, что они расположены очень далеко. Только современные телескопы с их потрясающей разрешающей способностью позволяют увидеть на Юпитере объекты, размеры которых не превышают десятков километров. На Нептуне можно увидеть детали размером в сотни километров. Важнейшая информация о природе планет-гигантов была получена с помощью ряда АМС («Пионер-10», «Вояджер-1 и -2», «Галилео» и др.).

Характерными особенностями видимого диска являются параллельные экватору полосы, хорошо видимые на Юпитере и Сатурне, на фотографиях, сделанных с Земли, АМС «Вояджер-2».

На снимках планет-гигантов видно, что полосы обладают сложной структурой, представляющей цепочки вихрей. Примерно 150 лет назад на Юпитере было открыто Большое Красное Пятно (см. вклейку III). В наше время были обнаружены меньшие пятна, более светлые и даже белые, не только на Юпитере, но и на Сатурне, Уране, Нептуне. По современным представлениям это гигантские атмосферные вихри, подобные антициклонам на Земле. Но если на Земле такие вихри существуют не более месяца, то Большое Красное Пятно, размеры которого намного превышают размеры Земли, может существовать в атмосфере Юпитера сотни, а может быть, и тысячи лет.

В декабре 1995 г. в атмосферу Юпитера вошел зонд с КА «Галилей». На зонде были получены важные данные о структуре облачного слоя Юпитера и химическом составе его атмосферы. Атмосфера Юпитера в основном состоит из водорода и гелия. Причем гелия оказалось заметно меньше, чем в первичном составе Солнца. Объясняется это тем, что гелий как более тяжелый осаждается в нижние слои атмосферы. На долю остальных элементов остается только 1% по массе. Углерода и серы оказалось в 2—3 раза больше, чем в составе Солнца. Результаты «Галилея» показывают, что температура ядра у Юпитера, по-видимому, не менее 20 000 К.

В июле 1994 г. с Юпитером столкнулась комета Шумейкера—Леви. Всего с Юпитером столкнулось 20 фрагментов. При столкновении с самым большим фрагментом взрыв был эквивалентен взрыву 6 миллионов мегатонных бомб. Спектроскопией было установлено, что в продуктах взрыва имелось большое количество соединений серы. По-видимому, именно соединения серы ответственны за окраску деталей планеты. К сожалению, фрагменты кометы падали на невидимую с Земли сторону планеты и только через несколько часов они попадали в зону видимости.

Полученные для Юпитера данные экстраполируются на другие планеты-гиганты. В 2004 г. к Сатурну приблизится и станет его искусственным спутником космический аппарат «Кассини». Его спускаемый зонд будет отправлен на спутник Сатурна Титан — единственный в Солнечной системе спутник, обладающий атмосферой.

2. Внутреннее строение планет-гигантов. Внутреннее строение планет-гигантов показано на вклейке III. Структура имеет вид оболочек. Различия в строении возникают из-за разнородности масс. Верхний слой облаков планет представляется видимой поверхностью. Облака состоят из капель и кристаллов жидких и твердых метана и аммиака. Несмотря на то что полосы метана и аммиака в спектрах планет хорошо заметны, их содержание в атмосфере составляет не более $5 \cdot 10^{-2}\%$. Ниже облаков лежит слой газожидкой атмосферы. Далее следуют слои молекулярного водорода и металлического водорода. Эти состояния вещества в земных условиях получить невозможно.

Наконец, в самом центре планеты расположено металлосиликатное ядро. В нем нет водорода, но, возможно, есть лед, несмотря на температуру 23 000 К. Объясняется это громадным давлением, достигающим $5 \cdot 10^{11}$ Па. Строение Сатурна такое же, но толщина слоев намного меньше (как намного меньше и размеры планеты).

Строение Урана и Нептуна очень простое, поскольку их массы намного меньше. У них только три оболочки: атмосфера, мантия из льдов и металлосиликатное ядро.

3. Спутники планет-гигантов. Планеты-гиганты обладают развитыми системами спутников. Так, Юпитер и Уран имеют по два десятка, а Сатурн почти три десятка спутников. Большинство из них — это небольшие (максимум десятки километров в поперечнике) ледяные глыбы. Но некоторые представляют большой научный интерес. Мы остановимся подробнее только на них.

Ио (см. вклейку IV) — ближайший к Юпитеру спутник из четырех, открытых Галилеем, диаметр его немного больше Луны. Это единственное тело Солнечной системы, на котором наблюдается активный вулканизм[*]. В 1979 г. АМС «Вояджер-2» обнаружил на Ио восемь действующих вулканов. По крайней мере один из них продолжает извергаться до настоящего времени. Причина вулканизма — разогрев недр приливным трением, вызванным притяжением Юпитера и его крупнейших спутников — Европы и Ганимеда.

Следующий за Ио спутник Юпитера — Европа (см. вклейку IV). Уже первые снимки с «Вояджера» привлекли внимание к этому спутнику. На Европе была обнаружена густая сеть пересекающихся линий. Более подробное изучение поверхности Европы, проведенное, в частности, АМС «Галилей», показало, что поверхность Европы представляет собой гигантский ледяной покров, разбитый многочисленными трещинами. Толщина покрова пока неизвестна. По разным оценкам, она составляет от 10 до 20 км. Правда, в последнее время считается, что толщина ледяного покрова существенно меньше.

Несколько лет назад было обнаружено, что в трещинах наблюдается движение огромных ледяных глыб, что интерпретируется как признак наличия на Европе жидкой воды. Наличие жидкой воды является необходимым условием существования жизни. Однако никаких исследований, которые могли бы подтвердить или опровергнуть это предположение, провести в настоящее время невозможно.

Спутник Сатурна — Титан и спутник Нептуна — Тритон привлекают внимание исследователей тем, что на них имеется плотная атмосфера, состоящая главным образом из азота.

4. Кольца планет-гигантов. Характерной особенностью планет-гигантов являются кольца. Наиболее хорошо развиты кольца у Сатурна (см. вклейку III), они открыты еще Галилеем и Гюйгенсом в начале XVII в. Кольца Урана (рис. 53) и Нептуна открыты наземными наблюдениями; кольцо Юпите-

---

[*] Вулканы на Венере не наблюдаются. Их существование установлено по косвенным признакам.

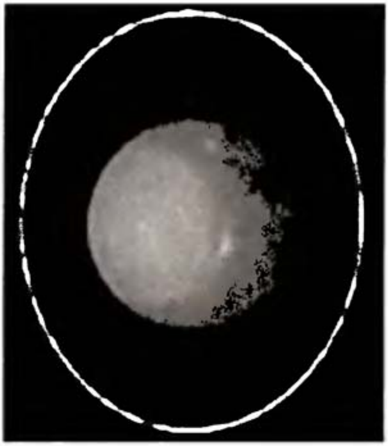


Рис. 53. Кольца Урана.

ра, расположенное практически в плоскости его экватора, слишком тонкое, чтобы его можно было наблюдать с Земли; оно сфотографировано АМС «Пионер-10».

Еще Максвелл установил, что кольца не могут быть сплошными. Они состоят из независимо двигающихся отдельных обломков, главным образом из водяного льда. Размер колец Сатурна около 60 000 км, а толщина не более 20 м. Кольца состоят из мелких частиц размерами от долей миллиметра до 10—25 м. Скорости частиц уравнены с высокой точностью, и их столкновения происходят с относительной скоростью в несколько миллиметров в секунду. Частицы представляют собой комки рыхлого снега. Они непрерывно разрушаются и снова объединяются в отдельные рыхлые глыбы.

Кольца представляют собой остатки того протопланетного облака, из которого сформировались планеты и их спутники. Вблизи массивных планет формирование массивных спутников оказалось невозможным и возникли кольца. Однако из части материала колец сформировались и небольшие спутники, которые движутся внутри системы колец. Именно гравитационное воздействие спутников, как движущихся внутри колец, так и движущихся вне их, обеспечивает распад колец на тонкие колечки и устойчивость всей системы. Однако до сих пор не удалось объяснить два феномена. Во-первых, на кольцах Сатурна замечены тонкие «спицы» — поперечные полоски; повидимому, это действие электростатических сил, хотя точный механизм неизвестен. Во-вторых, в кольцах Сатурна и Урана замечено переплетение колец. Этот феномен пока не получил удовлетворительного объяснения.

§ 19. АСТЕРОИДЫ И МЕТЕОРИТЫ

1. Астероиды. Астероидами (звездоподобными) называются малые планеты Солнечной системы, которые на снимках звездного неба неотличимы от звезд (большие планеты обладают заметными дисками).

Самые большие астероиды достигают в диаметре нескольких сотен километров (диаметр Цереры около 1000 км, Паллады — 608 км, Весты — 538 км; рис. 54). Тела, диаметр которых меньше одного километра, принято относить к метеорным телам. Массы малых планет лежат в пределах от 10^{12} до $1{,}3 \cdot 10^{21}$ кг (Церера), а средняя плотность — от 3 до $8 \cdot 10^3$ кг/м^3.

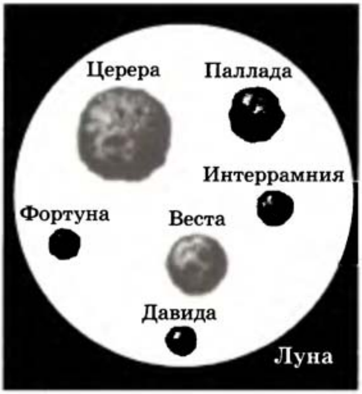


Рис. 54. Сравнительные размеры больших астероидов и Луны.

Для определения размеров и формы астероидов разработаны два метода: оптический и непосредственных измерений. Первый способ основан на том, что нагретое тело излучает в инфракрасной области спектра. Интенсивность зависит от температуры тела: при температурах, до которых нагревается астероид, вся энергия излучается в инфракрасной области спектра, где излучение Солнца невелико. В видимой же области спектра все излучение астероида есть отраженное излучение Солнца, энергию которого мы можем вычислить. Запишем теперь два уравнения:

$$E_{\text{отр}} = \alpha ES, \ E_{\text{инф}} = (1 - \alpha)ES,$$

где E — энергия солнечного излучения, падающего на единицу площади астероида (эта величина вычисляется по известным данным); $E_{\text{отр}}$ — энергия, отраженная астероидом; $E_{\text{инф}}$ — энергия, излучаемая астероидом в инфракрасной области спектра (обе величины непосредственно измеряются). В двух уравнениях две неизвестные величины, которые нужно вычислить: S — площадь поверхности астероида и α (альбедо) — отражательная способность астероида, т. е. та доля энергии падающего излучения, которую он отражает. Решение этих уравнений позволяет определить размеры астероида и отражательную способность его поверхности.

Яркость астероида, как правило, меняется со временем. Исследуя эти изменения, можно реконструировать и форму астероида.

Другой метод — метод непосредственного измерения размеров астероидов — основан на том, что современная теория движения планет позволяет проводить расчеты с такой точностью, что если астероид проходит между какой-нибудь звездой и Землей, то можно вычислить движение тени астероида по поверхности Земли. Для наблюдателя, попавшего в эту тень, происходит затмение звезды астероидом. На пути тени располагают ряд телескопов, направленных на звезду. В момент начала затмения она гаснет, в момент окончания снова вспыхивает. Зная скорость и направление движения тени, можно определить размеры астероида, а сопоставляя измерения ряда наблюдателей, — и его форму. Следует заметить, что поскольку звезды бесконечно далеки, то от них идет параллельный пучок света, т. е. тень астероида точно соответствует его форме. Оказалось, что астероиды бывают очень темными (Бамберга отражает всего 3% падающего света, он темнее сажи) и очень светлыми (Веста отражает 28%). Астероиды вращаются вокруг своих осей довольно быстро: их периоды составляют 5—6 ч.

Форма больших, диаметрами в сотни километров, астероидов близка к сферической. Мелкие астероиды имеют неправильную, обломочную форму. В настоящее время с помощью автоматических межпланетных аппаратов получено достаточно большое количество снимков астероидов (см. вклейку V).

Размер астероида Гаспра — 19×12×11 км, что практически совпадает с размером Фобоса, Матильды — 50×50×70 км, Иды — 56×24×21 км. В 2000 г. космический аппарат «Ниар» опустился на поверхность астероида Эрос (наибольший диаметр 32 км). Это была экспериментальная посадка, поскольку аппарат уже выработал свой ресурс. Очередную посадку на астероид уже для подробного исследования астероида предполагается осуществить через несколько лет.

Значительный интерес для исследователей представляет астероид Гектор. Это обломок, близкий по форме к параллелепипеду с длинной стороной 300 км и короткой — 20 км. Он настолько быстро вращается (период около 7 ч), что некоторые исследователи выражают удивление по поводу его прочности. В последние годы обнаружено, что у нескольких астероидов имеются спутники — еще более мелкие астероиды. Первым таким спутником был спутник Иды — Дактиль.

2. Метеоры и метеориты. Если внимательно наблюдать за звездным небом в темную ночь, то нетрудно заметить, как на небе вспыхивает и пролетает падающая звезда. Это метеор — вторгающееся в земную атмосферу со скоростью от 11 до 73 км/с крошечное метеорное тело — пылинка массой в доли грамма. Попадая в плотные слои атмосферы на высоте 80—30 км, метеор раскаляется из-за трения о воздух и сгорает. Иногда он оставляет за собой светящийся след из раскаленных газов и мельчайшей пыли. След этот хорошо виден на экранах локаторов или визуально, если след освещен Солнцем.

В среднем можно наблюдать до 10 метеоров в час. Но в определенные периоды число метеоров резко возрастает. Земля проходит через метеорный поток. Метеорный поток — это группа метеоров, движущихся по очень близким орбитам. Обычно это группа метеорных тел, образовавшихся при распаде кометы. Поскольку они движутся по параллельным путям, то кажется, что они вылетают из одной точки неба (аналогично кажется, что железнодорожные рельсы сходятся к горизонту в одной точке), которая называется «радиант». Наиболее интенсивны потоки Аквариды (19 мая), Персеиды (5—18 августа), Леониды (20—24 октября). Называются они по созвездию, в котором находится радиант (соответственно Водолей, Персей, Лев).

Рис. 55. Падение болида.

Если в атмосферу вторгается тело большой массы (сотни граммов и больше), то наблюдается болид (рис. 55), представляющий собой летящий огненный шар с хвостом. Нередко болид сопровождается громовыми ударами и очень редко характерным шелестящим звуком. Если вам посчастливится наблюдать болид, то нужно очень тщательно и подробно описать явление, особенно траекторию движения болида (если удастся определить ее относительно звезд), с указанием точного времени и описание послать в Москву в Комитет по метеоритам РАН.

Если в земную атмосферу влетает метеорное тело со скоростью не более 22 км/с и массой в несколько килограмм, то испарится не все вещество (при этом метеорное тело не должно разрушаться); тогда оно, потеряв скорость, упадет на Землю. Упавшее метеорное тело называется метеоритом. Несмотря на то что ежесуточно на Землю выпадает до 100 тонн метеорного вещества, падение метеорита очень редкое событие. О каждом таком случае нужно немедленно сообщать в Комитет по метеоритам. Метеориты и лунный грунт единственные образцы внеземного вещества, изучаемые в земных лабораториях.

Метеориты могут быть железными или каменными. Железные состоят из не встречающегося на Земле сплава железа и никеля, каменные — из хорошо видных на изломе маленьких шариков-хондр. Химический состав их — силикаты, образующие минералы, которые в основном известны на Земле. Минералов, характерных для метеоритов, известно немного. Падение метеорита настолько редкое явление, что в настоящее время в музеях мира хранятся образцы не более 2000 метеоритов (в коллекции РАН примерно 160). Еще реже происходят падения очень больших метеоритов размерами в десятки, сотни и больше метров. Падая на Землю, они не успевают затормозиться и, достигнув поверхности Земли, взрываются, образуя метеоритный кратер. Один из таких кратеров (см. вклейку V) находится в Аризоне (США). Его диаметр около 1200 м, глубина 175 м.

После полетов на Луну, когда метеорная гипотеза образования кратеров стала общепринятой теорией, были предприняты поиски таких кратеров и на Земле. Специальные аэро- и космические съемки помогли обнаружить 115 метеоритных кратеров. Возраст их превышает многие миллионы лет.

В последние годы обнаружены метеориты, изотопный состав которых совпадает с изотопным составом вещества Луны и Марса. По-видимому, эти метеориты образовались при падении крупных метеорных тел на Луну или Марс. При этом не исключается возможность, что отдельные фрагменты коры Луны и Марса могут приобрести вторую космическую скорость. Такие небольшие тела могут достигнуть Земли и упасть на ее поверхность в виде метеоритов.

В отдельных метеоритах, прилетевших с Марса, обнаружены частицы, которые некоторые ученые рассматривают как следы неких живых организмов. В настоящее время идет оживленная дискуссия по этому поводу. Обе стороны, как сторонники, так и противники жизни на Марсе, приводят аргументы, которые их оппоненты опровергнуть не могут. Для решения этого вопроса просто не хватает экспериментальных данных. Остается только ожидать, когда осуществляемые и планируемые полеты к Марсу дадут материал, подтверждающий или опровергающий существование жизни на Марсе в наше время или в далеком прошлом.

§ 20. КОМЕТЫ

Кометы — тела Солнечной системы, представляющиеся туманным объектом специфической формы (см. вклейку V). В комете различают голову — светящуюся туманную оболочку с увеличением яркости к центру, где обычно наблюдается более яркое ядро, и протяженный хвост, всегда направленный от Солнца.

Кометы достигают громадных размеров: их головы могут иметь диаметр в миллион километров, а хвосты — длину в сотни миллионов километров. Угловые размеры такого хвоста достигают 160—180°. Гигантские кометы появляются 3—5 раз в столетие. Большинство комет существенно меньше и видно только в телескоп.

Несмотря на столь внушительные размеры, массы комет весьма малы, меньше десятимиллионной доли массы Земли. Бóльшая часть массы вообще сосредоточена в твердом ядре, размеры которого, как показали сделанные в 1986 г. АМС «Вега» снимки кометы Галлея, не превышают 20 км (см. вклейку V). Видимые голова и хвост представляют собой газовые образования, светящиеся под действием солнечного излучения.

Плотность их практически не отличается от плотности межпланетной среды. В 1 $см^3$ головы или хвоста комет содержится не более 100—200 атомов и молекул.

По современным представлениям в наиболее отдаленных областях Солнечной системы, на расстояниях порядка 100 000 а. е., движется огромное число небольших тел, представляющих собой комки слипшихся пылинок, окутанных водородным, водяным и углеводородным снегом. Совокупность этих тел получила название «облако комет». Образовалось оно одновременно с Солнечной системой около 5 млрд лет назад, т. е. в кометах сохранилось то вещество, из которого формировались планеты. Поэтому изучать кометы очень важно. Отдельные тела движутся в облаке с очень малыми относительными скоростями (доли метра в секунду). Случайные столкновения могут привести к уплотнению тел, их слипанию или разрушению.

В результате весьма длительных процессов большинство тел облака приобретает размеры в несколько, возможно в несколько десятков, километров. Под действием ионизирующего излучения и космических лучей (которые представляют собой потоки элементарных частиц большой энергии) в «снеге» идут сложные химические реакции, и за миллиарды лет в нем возникают сложные химические соединения. Эти тела в дальнейшем становятся твердыми ядрами комет.

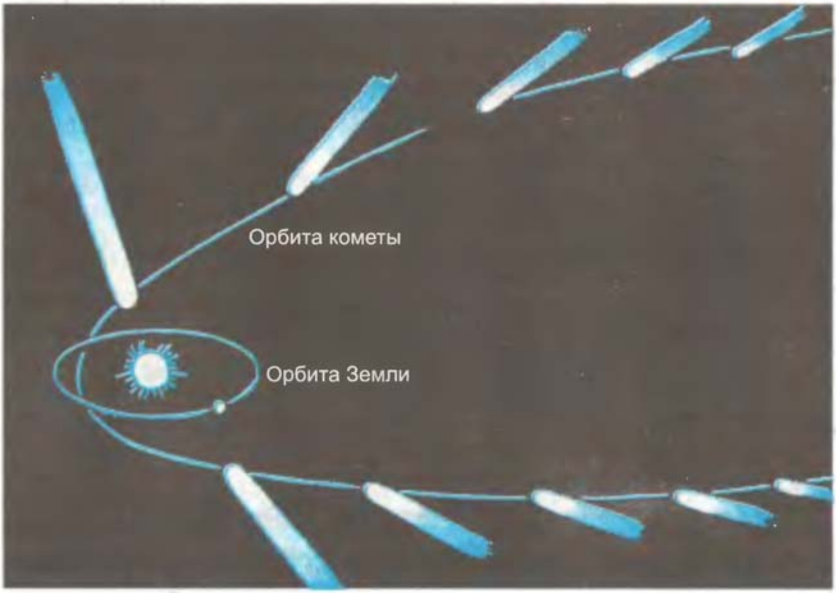


Рис. 56. Изменение хвоста кометы во время движения по орбите.

Периодически в результате случайных столкновений или возмущений от ближайших звезд тело из облака комет может быть вброшено в центральные области Солнечной системы. Если при этом произойдет сближение с одной из планет-гигантов, то возможен (и иногда осуществляется) случай, когда это тело перейдет на орбиту, проходящую в непосредственной близости к Солнцу.

На расстоянии, примерно равном расстоянию от Солнца до Юпитера, поверхность твердого ядра кометы нагревается настолько, что начинается испарение замерзших газов. По мере приближения к Солнцу испарение усиливается и образуется светящееся газовое облако. Под действием давления света и солнечного ветра газы начинают двигаться от Солнца и у кометы появляется хвост, также направленный от Солнца. После прохождения ближайшей к Солнцу точки орбиты температура на поверхности твердого ядра падает, испарение уменьшается и постепенно хвост исчезает (рис. 56).

Но испаряются только легкоплавкие компоненты. Силикатные и железные пылинки остаются, и на поверхности появляется пылевая корка, хорошо защищающая внутренние области ядра от чрезмерного нагрева. Как хорошо видно у периодических комет, количество газа, испаряемого кометой, уменьшается с каждым прохождением вблизи Солнца. Прочность ядра уменьшается, и комета разрушается. Распад кометы непосредственно наблюдался у кометы Биэлы (1848). Через несколько лет после окончательного разрушения кометы Земля пересекла ее орбиту. В эти дни наблюдался исключительной силы «метеорный дождь». В минуту появлялось более 1000 метеоров; наблюдатели рассказывали, что в Берлине в это время стало настолько светло, что можно было читать.

1. Охарактеризуйте строение Солнечной системы (перечислите ее основные элементы).

2. Укажите основные характеристики планет группы Земли.

3. Укажите основные характеристики планет-гигантов.

4. Каковы особенности вращения Юпитера, Сатурна и Урана?

5. Укажите причины появления кратеров на поверхности планет и их спутников.

6. Что такое падающая звезда?

7. Опишите строение кометы.

8. Почему кометный хвост всегда направлен от Солнца?

9. Что такое метеорит?

10. Период обращения кометы Галлея 76 лет. Минимальное расстояние от Солнца 0,5 а. е. Определите ее максимальное расстояние от Солнца.

Глава V

МИР ЗВЕЗД

§ 21. СОЛНЦЕ

1. Физические характеристики Солнца. Ближайшая к нам звезда — Солнце (см. вклейку VI) является одновременно и самым ярким объектом на небе. Поток тепла и света, идущий от него, дает возможность существовать жизни на нашей планете. Все, что происходит на Солнце, самым непосредственным образом сказывается на Земле. Уже этим определяется наш интерес к Солнцу. Но, кроме того, Солнце является единственной звездой, у которой наблюдается видимый диск, что дает возможность детально изучать процессы, которые не могут быть исследованы у других звезд. Поэтому изучение Солнца помогает нам понять природу других звезд и, наоборот, изучение звезд помогает исследовать Солнце. Звезды (в том числе и Солнце) представляют собой газовые (точнее, плазменные) шары. С физической точки зрения они характеризуются тремя величинами: массой M, радиусом R и светимостью L.

Полная энергия, излучаемая звездой в единицу времени, называется светимостью. Поскольку Солнце является типичной звездой, характеристики которой определены с максимально возможной точностью, то массу, радиус и светимость других звезд принято выражать по отношению к тем же параметрам Солнца, которые в системе СИ имеют значения:

$$M_{\odot}=2\cdot10^{30}\ \text{кг},\ L_{\odot}=4\cdot10^{26}\ \text{Вт},\ R_{\odot}=7\cdot10^{8}\ \text{м}$$

($\odot$ — обозначение Солнца).

В последние годы получено несколько изображений звездных дисков, но трудности получения изображений и малое количество деталей не позволяют непосредственно сравнивать их с изображением Солнца.

Солнце представляется наблюдателю в виде небольшого диска диаметром около 0,5°. Его яркость исключительно велика. **Смотреть на Солнце категорически запрещается не только в любой оптический прибор, но даже невооруженным глазом, так как это может привести к мгновенной и необратимой слепоте.**

При изучении Солнца его либо фотографируют, либо проецируют на специальный экран.

2. Некоторые физические законы. В этом пункте мы решили дать формулировки, формулы и краткие объяснения основных законов излучения. Только используя эти законы, мы получаем возможность определять физические условия в звездах, расшифровывать процессы, в них происходящие, изучать строение звезд. Этот пункт можно пропустить, но в дальнейшем мы будем ссылаться на них без объяснения, сразу же приводя полученные на их основании результаты.

Известно, что свет (электромагнитное излучение) переносит энергию и может излучаться и поглощаться. Излучение света происходит благодаря переходам электрона с одного энергетического уровня на другой в виде возникновения кванта света. Переходы могут быть внутри атома, когда электрон переходит с одного энергетического уровня на другой с более низкой энергией (обратный переход — поглощение, квант исчезает, электрон поднимается на другой уровень). Этот процесс подробно рассматривается в курсе физики. В плазме излучение возникает главным образом при рекомбинации ионов. Свободный электрон переходит на один из энергетических уровней атома.

Кроме того, в плазме имеется множество систем положительный ион — отрицательный электрон, полная энергия которых положительна и полностью подобна гравитационно-несвязанной системе (см. § 10, п. 1). Пролетая вблизи иона, свободный электрон спонтанно или вынужденно (при взаимодействии с квантом света) переходит на другую орбиту. Отметим, что взаимодействие с квантом может вызвать переход на более низкую (с меньшей энергией, излучение кванта) или более высокую (с большей энергией, поглощение кванта) орбиту.

Поглощенный квант немедленно переизлучается, но летит уже в другом случайном направлении. Процессы излучения и поглощения описываются квантовой механикой.

При температурах более 10 000 К и плотностях более 10^{15} частиц в 1 $см^3$ вещество находится в состоянии полностью ионизованной плазмы.

Поглощаясь и переизлучаясь, кванты света медленно перемещаются к более холодной области, неся с собой энергию и стремясь уравнять температуры. Но рано или поздно излучение достигнет прозрачной области и выйдет из среды, в которой оно образовалось. Именно это происходит в звезде. Позднее мы увидим, что в центральных областях звезды выделяется энергия, которая в конце концов дойдет до ее поверхности и выйдет в пространство. Часть этого излучения достигнет наших приборов и будет не только зарегистрирована, но и проанализирована.

Поговорим о свойствах излучения. Совершенный излучатель называется абсолютно черным телом. Такое тело полностью поглощает все падающее на него излучение, но оно же и излучает полученную энергию тоже в виде электромагнитных волн. Свойства этого излучения зависят только от температуры абсолютно черного тела. Сразу скажем, что свойства этого излучения (оно называется тепловым) практически совпадают со свойствами излучения, распространяющегося в горячей плазме.

Прохождение излучения через слой вещества сопровождается поглощением излучения. В результате излучение ослабляется. Ослабление описывается формулой, называемой законом Бугера:

$$I = I_0 e^{-\tau}.$$

В этой формуле I и I_0 — интенсивности излучения, т. е. количества энергии, переносимой излучением в единицу времени через единичную площадку; τ — оптическая глубина*, равная коэффициенту поглощения, умноженному на пройденный в веществе путь. Коэффициент поглощения зависит от температуры, плотности и химического состава вещества. Из формулы закона Бугера следует, что, проходя слой, оптическая глубина которого равна единица, излучение ослабевает в 2,7 раза.

Все нагретые тела (твердые, жидкие или газообразные), оптическая толщина которых больше единицы, испускают электромагнитное излучение, возникающее в веществе за счет внутренней энергии. Это излучение характеризуется непрерывным спектром и называется тепловым излучением. Его мощность определяется ***законом Стефана—Больцмана.***

Энергия, излучаемая поверхностью нагретого тела, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Поверхность площадью 1 м^2 излучает ежесекундно энергию, определяемую формулой

$$E = \sigma\ T^4,$$

где $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2 \cdot$К^4) — постоянная Стефана—Больцмана.

В каждой длине волны, точнее в единичном интервале длин волн, в центре которого расположена данная длина волны, проходит свое количество энергии, которое определяется только температурой. Это называется распределением энергии в спектре звезды. Распределение энергии в спектре определяется сложной формулой. Кривая, его описывающая (рис. 57), имеет максимум, положение которого выражается ***законом Вина.***

Длина волны максимума излучения обратно пропорциональна абсолютной температуре излучающего тела. Положение максимума излучения определяет цвет звезды:

$$\lambda = b/T.$$

---

*τ называют **оптической толщиной**, если говорят о поглощении в слое вещества; если же речь идет об излучении слоя, лежащего внутри, то оптическая толщина вышележащих слоев называется **оптической глубиной.**

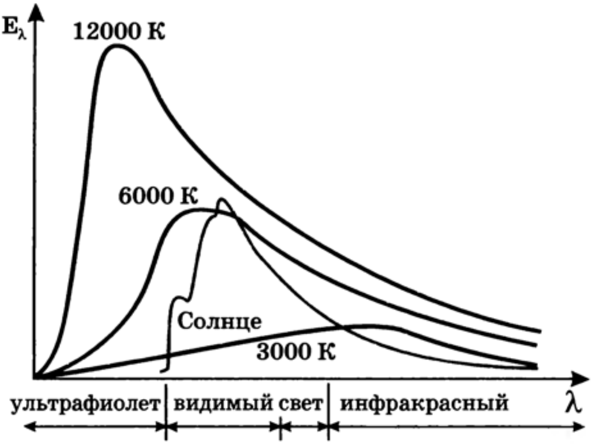


Рис. 57. Распределение энергии в спектре.

3. Процесс передачи энергии в веществе. В звезде происходит процесс передачи энергии в веществе. Энергия генерируется главным образом в центральных ее областях и постепенно передается к поверхности, где и излучается в пространство. Процесс передачи энергии очень сложен, но не требуется точного количественного расчета — все оказывается достаточно просто.

Сам процесс передачи тепла описывается достаточно сложным уравнением, которое так и называется — уравнением теплопроводности. Мы запишем его в самой простой и общей форме:

$$F=-D\frac{\Delta T}{\Delta L}.$$

Смысл этого выражения понятен, если выразить его словами: «Количество тепла, передаваемого через единичную площадку в единицу времени (поток тепла), F пропорционально отношению $\frac{\Delta T}{\Delta L}$, т. е. скорости уменьшения температуры». Математики называют эту величину градиентом температуры — так будем называть ее и мы. Коэффициент пропорциональности D зависит от способа передачи тепла. Называется он коэффициентом теплопроводности.

Всего в природе существует три способа передачи тепла. Определим их.

1. *Теплопроводность*. Как известно, количество тепла — это всего лишь сумма кинетических энергий отдельных молекул, т. е. там, где температура выше, быстрых молекул больше. Сталкиваясь с соседними, более быстрые молекулы передают им свою энергию, и тепло передается в соседние, более холодные области. Теплопроводность эффективна в твердых

телах, менее эффективна в жидкостях и совершенно неэффективна в газах. Когда же в газах или жидкостях теплопроводность не обеспечивает достаточно быстрый отток тепла, градиент температуры резко возрастает за счет возрастания температуры в горячей области. В жидкости и газе начинается конвективное движение.

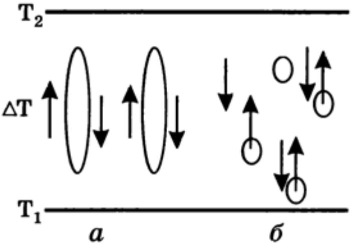


Рис. 58. Конвекция (*а* — в жидкости; *б* — в газе).

2. *Конвекция*. Возникает в поле сил тяжести, если подогрев слоя жидкости или газа идет снизу (рис. 58). Подогрев жидкости (см. рис. 58, *а*) приводит к тому, что она расширяется и более легкая жидкость поднимается, образуя конвекционную струю. На рисунке стрелками показано движение струй жидкости.

В газах образуется не струя, а пузырь (см. рис. 58, *б*), в котором температура выше, чем в окружающей среде. Размер пузыря зависит от физических условий. В конвективной зоне Солнца его диаметр достигает 700—800 км. Нагретый воздух легче и поднимается под действием силы Архимеда. При подъеме давление в окружающей среде уменьшается и пузырь расширяется. Поскольку теплопроводность газа мала, пузырь расширяется адиабатически, и температура в нем падает. Если проследить за отдельным пузырем и фиксировать изменение температуры в нем в зависимости от положения пузыря, то обнаружится, что определенный таким образом градиент температуры имеет строго определенное значение в зависимости от физических условий (температуры, плотности химического состава вещества) — значение, называемое адиабатическим градиентом.

Если градиент температуры окружающего газа больше адиабатического, то по мере подъема газ в пузыре остается более горячим, чем окружающий газ, и пузырь продолжает подниматься. Если же температура окружающей среды падает медленно (градиент температуры меньше адиабатического), то пузырь быстро сливается с окружающим газом, и конвекция не возникает. При развитой конвекции значение градиента температуры только на малую величину превышает адиабатический градиент. Пузырь в процессе движения разрушается, передавая свою энергию окружающей среде. Отметим, что конвекция переносит любое количество тепла. Просто при увеличении потока тепла увеличивается скорость конвективных течений жидкости или газа.

Каждый из нас встречался с конвекцией достаточно часто. Приведем несколько примеров. Посмотрите на закипающую, но еще не закипевшую воду в кастрюле. Движение воды в ней и есть конвекция в жидкости. Труднее увидеть конвекцию в газах, но и это возможно. В жаркий летний день Солнце нагревает почву, которая, в свою очередь, нагревает воздух. Градиент температуры в воздухе достаточно большой, и пузырь, оторвавшись, поднимается вверх. Его не видно, но когда температура в пузыре падает до точки росы, начинается конденсация воды и появляется облако. Астроному известно проявление конвекции на Солнце — это грануляция (см. вклейку VI). Каждая гранула представляет собой горячий пузырь, вернее его верхнюю часть, выходящую на поверхность Солнца.

3. *Лучистый перенос*. Основным способом переноса энергии в газе или плазме высокой температуры (4000 К и выше) является лучистый перенос, т. е. перенос энергии электромагнитным излучением. Процесс переноса излучением определяется уравнением теплопроводности, где коэффициент зависит главным образом от коэффициента поглощения, который, в свою очередь, определяется химическим составом, плотностью и температурой в данном месте. При этом коэффициент теплопроводности D в уравнении теплопроводности уменьшается с увеличением коэффициента поглощения.

Количество энергии, которое может быть передано лучистым переносом, небесконечно велико. Как только поток энергии увеличится или увеличится коэффициент поглощения, увеличится и градиент температуры. Как только его значение превысит адиабатический градиент, появится конвекция.

4. Формирование наблюдаемого излучения Солнца. Фотосфера. Потемнение к краю. Разобьем мысленно Солнце на концентрические сферы (рис. 61). Самую внешнюю сферу проведем так, чтобы вышедшее с ее поверхности излучение уже почти не поглощалось в вышележащих слоях Солнца (сфера *0* на рисунке 59). Условие «почти не поглощалось» слишком неопределенное. Поэтому таких сфер можно провести сколько угодно, но выбирают сферу так, чтобы ее радиус был по возможности меньшим. Некоторая неопределенность в этом выборе не играет никакой роли. Назовем эту сферу нулевым уровнем. От этого уровня отсчитывается вдоль радиуса геометрическая глубина. Толщину каждого следующего слоя выбираем так, чтобы излучение, распространяющееся вдоль радиуса, ослаблялось в 2,7 раза (это число выбрано согласно требованиям математического анализа). В астрофизике принято говорить, что такой слой имеет оптическую толщину, равную единице, а поверхность сферы *1* лежит на оптической глубине, равной единице.

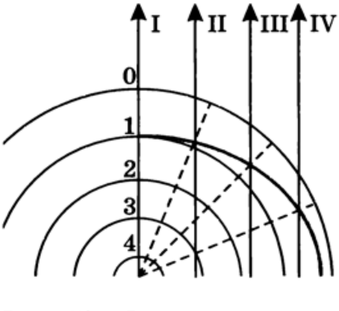


Рис. 59. Формирование наблюдаемого излучения Солнца.

Рассмотрим излучение, приходящее к нам от центра видимого диска Солнца (оно распространяется вдоль луча *I*). Это излучение формируется всеми слоями Солнца. Однако вклад в приходящее к нам излучение каждого из них неодинаков. Небольшой вклад вносят самый поверхностный слой (его температура относительно невысокая и излучаемая энергия мала) и самые глубокие слои (слои *4* более глубокие, см. рис. 61).

В глубоких слоях температура высокая и излучается много энергии, но бóльшая ее часть поглощается веществом вышележащих слоев. Пройдя слой, оптическая толщина которого равна единице, излучение ослабляется в 2,7 раза. Как показывают расчеты, подавляющая часть излучения, приходящего к нам от Солнца, формируется на поверхности сферы *1*, т. е. оно ослабляется по пути к наблюдателю в 2,7 раза (ослабление происходит на пути от сферы *1* к сфере *0*, так как дальше поглощения нет). Интенсивность излучения определяется температурой на поверхности сферы *1*, которая лежит на оптической глубине, равной единице.

Слой, в котором формируется подавляющая часть излучения, приходящего к наблюдателю, называется фотосферой звезды.

Поверхностью фотосферы (соответственно и поверхностью звезды) условно называется уровень, излучение которого, проходя в направлении к наблюдателю, ослабляется за счет поглощения в вышележащих слоях вещества точно в 2,7 раза. Температура на этом уровне считается температурой Солнца, она равна 5700 К.

Луч *I* (см. рис. 59) показывает направление распространения излучения, идущего к нам от центра, а лучи *II—IV* — от точек, расположенных ближе к краю диска. Физические условия в слое, ограниченном сферами *1* и *0*, меняются так, что оптическая глубина, измеренная вдоль лучей *II—IV*, пропорциональна пути, пройденному в области между нулевой и первой сферами. Как видно из рисунка, слой, из которого приходит к нам излучение, на краю диска расположен на меньшей геометрической глубине. Но температура вещества уменьшается с уменьшением глубины. Поэтому от края диска к нам приходит меньше энергии. Это и является причиной потепления к краю. Явление потемнения к краю характерно для любого светящегося газового шара. У твердых тел, особенно шероховатых, светящихся отраженным светом, наблюдается обратный эффект, который проявляется в том, что край видимого диска Луны более яркий. В этом легко убедиться, посмотрев на Луну.

Требует объяснения и такое явление. Даже при наблюдении в телескоп край Солнца представляется резким. В то же время ясно, что в газе не может быть никаких граничных поверхностей.

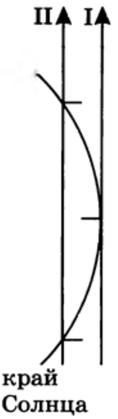


Рис. 60. К объяснению резкости солнечного края.

На рисунке 60 показаны отдельно два луча, проходящие вблизи видимого края Солнца. В луче *I* оптическая глубина равна единице, в луче *II* — нулю. Соответственно и излучение в направлении луча *I* формируется на уровне фотосферы, а в луче *II* равно нулю. Расстояние между лучами около 300 км, оно соответствует для наблюдателя на Земле углу 0,5″, что недоступно большинству солнечных телескопов. Именно поэтому край Солнца нам кажется резким.

5. Формирование наблюдаемого спектра. Тепловое излучение характеризуется непрерывным спектром, т. е. при изменении длины волны количество энергии, приходящей к нам, меняется плавно. Но реальный спектр звезды (в том числе и Солнца) характеризуется большим количеством спектральных линий — тонких полосок, пересекающих полосу непрерывного спектра (см. § 2 и вклейку VI). Изучение этих линий — основной источник информации о физических процессах, происходящих в звездах. Возникновение спектральных линий связано с тем, что атом сильно поглощает только в определенных (для каждого вида атомов своих) участках спектра. Поглощенная энергия сразу же переизлучается. Но в то время как поглощается энергия, распространяющаяся главным образом наружу, переизлучение идет во всех направлениях, в том числе и в противоположном первоначальному. В результате там, где в спектре находится линия, приходит меньше излучения, и это место в спектре кажется нам темным. Поскольку излучение и в спектральной линии приходит с оптической глубины, равной единице, а поглощение в ней намного больше поглощения в непрерывном спектре, то строение самой спектральной линии несет информацию о более высоких слоях звезды. О том, что ослабление интенсивности света в линии объясняется переизлучением во все стороны, говорит и так называемый спектр вспышки.

Во время полного солнечного затмения, когда диск Луны уже закрывает диск Солнца (отрезает луч *I*, но еще не закрыл луч *II* на рисунке 60), спектр Солнца мгновенно меняется. Исчезает непрерывный спектр, а на месте темных линий поглощения вспыхивают яркие линии излучения. Само явление продолжается около четверти секунды, почему его спектр и назван спектром вспышки.

Наличие в спектре линий поглощения или излучения говорит только о том, что в веществе есть атомы того элемента, которому принадлежит спектральная линия. Однако это еще ничего не говорит о количестве этих атомов. Так, в спектре Солнца самые сильные линии (т. е. самые темные) — линии ионизованного кальция (Ca^+), в то время как в веществе Солнца на 1 млн атомов водорода приходится всего один атом кальция; линий же гелия в спектре Солнца не видно вообще, хотя его атомов в 100 000 раз больше, чем атомов кальция. Всего в спектре Солнца наблюдается более 20 000 линий почти 80 элементов.

Наличие спектральных линий того или иного элемента в видимой области спектра зависит главным образом от температуры звезды. В Приложении II приведены спектральные характеристики некоторых типичных звезд. Мы видим, что в звездах очень горячих и очень холодных нет линий водорода, а в не слишком горячих нет линий гелия. Между тем точный анализ с помощью квантовой механики, а также расчеты внутреннего строения звезд показали, что химический состав звезд практически одинаков. Самый распространенный во Вселенной элемент — водород. По массе его примерно 70%. На втором месте — гелий. На каждый миллион атомов водорода приходится 100 000 атомов гелия (по массе около 30%). Далее идут кислород — 700 атомов, углерод — 400 и т. д.: чем тяжелее атом элемента, тем реже он встречается.

6. Температура звезды (Солнца). Мы часто говорим о температуре Солнца и звезд, но это понятие несколько отличается от привычного нам понятия температуры. Само понятие «температура» возникает в термодинамике и применимо только при условии термодинамического равновесия. В звезде же такового нет. В достаточно плотных слоях звезды (в фотосфере и глубже) можно считать, что в малом объеме условие термодинамического равновесия есть. Такое положение мы называем локальным термодинамическим равновесием.

Любые сведения о звезде (Солнце) мы получаем, анализируя ее излучение, главным образом ее спектр. Как же определять температуру?

На рисунке 59 показаны распределение энергии в спектре абсолютно черного тела при разных температурах (температура обозначена у каждой кривой) и распределение энергии в спектре Солнца. Если считать, что звезда излучает по законам излучения абсолютно черного тела, то можно определить температуру по закону Вина. Приняв, что максимум излучения у Солнца приходится на длину волны 430 нм, получим, что температура Солнца равна 6750 К. Но если принять, что площади под искомой кривой Планка и под кривой распределения энергии в спектре Солнца одинаковы (выполняется закон Стефана — Больцмана), то температура Солнца окажется равной 5760 К. Для определения температуры звезды применяют и другие методы, основанные на процессах, происходящих в их атмосферах. Различия результатов объясняются тем, что наблюдаемое излучение Солнца формируется в разных слоях, в каждом из которых своя температура.

7. Определение химического состава Солнца и звезд. Очень скоро после открытия спектрального анализа были получены спектры Солнца и было доказано, что вещество Солнца состоит из тех же химических элементов, что и Земля. Правда, после того как появились спектры звезд, ясности стало меньше. Удивительным было то, что гелий был открыт в спектре солнечной короны, а в спектре Солнца его обнаружить не удалось. Удивляло разнообразие звездных спектров. В одних из них не было ничего, кроме линий гелия, и даже ионизованного гелия, в других один водород, в третьих водорода нет, но есть множество линий самых разнообразных элементов.

Появление квантовой механики позволило разобраться во всем этом разнообразии. Выяснилось, что особенности спектров определяются главным образом температурой того слоя, в котором образуются спектральные линии. При различных температурах создаются условия для появления разных спектральных линий. Для простоты рассмотрим появление в спектре звезды линий водорода.

Как известно из физики, спектр водорода образуется при переходах электрона внутри атома с одного энергетического уровня на другой. В частности, линии водорода появятся в спектре только тогда, когда в веществе значительное количество атомов водорода имеет электрон на втором энергетическом уровне. Чем больше таких атомов, тем сильнее наблюдаемая линия.

В звездах с низкой температурой атмосферы (3000—4000 К) атомов водорода с электроном на втором уровне нет. Ведь, для того чтобы перевести электрон на второй уровень, он должен получить достаточно большую энергию при столкновении с другим атомом или свободным электроном. Но при столь низких температурах атомов и электронов с такой большой энергией просто очень мало.

При температурах около 10 000 К в большинстве атомов водорода электроны находятся именно на втором энергетическом уровне и в спектре видны мощные линии водорода. При еще больших температурах водород уже ионизован и в спектре его линий нет, зато появляются линии гелия, и при температурах около 35 000 К в спектре видны только линии гелия и ионизованного гелия.

Нужно сказать, что при низких температурах почти все атомы водорода имеют электрон на самом низком, основном уровне, их линии поглощения лежат в далекой ультрафиолетовой области спектра.

Когда удалось провести расчеты спектральных линий, смогли определить и истинный химический состав звезд. Он оказался удивительно одинаковым. Во всех звездах, точнее во всей Вселенной, преобладающими элементами являются водород (около 65% по массе) и гелий (около 35% по массе). На долю всех остальных химических элементов приходится не более 1% по массе.

Химический состав вещества звезд, несомненно, зависит от их возраста. В самых старых звездах количество тяжелых (тяжелее гелия) химических элементов не превышает 0,1%, а в самых молодых доходит до 4%. Это очень важный факт для теории эволюции звезд, галактик и Вселенной (см. § 33).

§ 22. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ОБОЛОЧЕК

1. Оболочки Солнца. Фотосфера Солнца излучает настолько много света, что слабое излучение более высоких его слоев можно наблюдать только во время полного солнечного затмения, когда диск Луны полностью закрывает фотосферу и становятся видны хромосфера и корона Солнца. Фотосфера, хромосфера и корона называются оболочками Солнца. Все вместе они образуют атмосферу Солнца.

Хромосфера (см. вклейку VI) — слой, лежащий непосредственно над фотосферой. Свое название «цветная сфера» она получила за яркий красный цвет. Во время затмения она видна как узенькая (толщина хромосферы 12 000 — 15 000 км) красная полоска, окаймляющая диск Солнца. Плотность вещества в хромосфере намного ниже, чем в фотосфере, поэтому оптическая глубина ее в непрерывном спектре мала и практически все ее излучение сосредоточено в линиях (поскольку в частотах линий поглощение намного сильнее, оптическая толщина хромосферы в линиях больше единицы). Самые сильные линии — линия Ca^+ в фиолетовой области спектра и линия водорода в красной области, что и обусловливает характерный красный цвет хромосферы. Солнечная корона (см. рис. 61 и вклейку VI) — жемчужно-серебристая иногда с красным, иногда с зеленым оттенком — простирается от Солнца на несколько радиусов. В ее спектре наблюдаются яркие линии многократно ионизованных атомов железа, никеля, кальция, алюминия. Это свидетельствует о высокой температуре вещества.

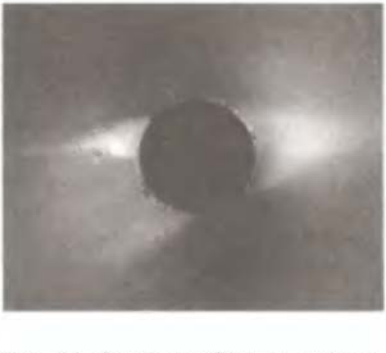


Рис. 61. Затмение Солнца, корона.

Практически все радио- и рентгеновское излучения Солнца формируются в короне. Радиоизлучение связано со сложными движениями плазмы в магнитном поле короны, рентгеновское излучение является прямым следствием ее крайне высокой температуры ($1,5\cdot10^6$—$2\cdot10^6$ К).

Другие, сходные с Солнцем звезды обладают коронами, часто гораздо более плотными и протяженными. Об этом свидетельствует зарегистрированное на ИСЗ рентгеновское излучение близких к нам звезд. Звезды с более высокой температурой, чем у Солнца (>8000 К) корон не имеют.

2. Грануляция. На фотографиях Солнца хорошо видно (см. вклейку VI), что его поверхность образована совокупностью ярких площадок, разделенных более темными промежутками. Эти площадки называются гранулами, а явление их образования — грануляцией. Средний размер гранул около 700 км, среднее время жизни около 8 мин.

Каждая гранула — это конвективный пузырь, достигший поверхности Солнца. Его верхняя часть попадает в область, где оптическая глубина меньше единицы, и излучение практически свободно уходит в космос. Температура в пузыре примерно на 200 К выше, чем в окружающей фотосфере, поэтому его яркость заметно выше.

3. Хромосфера. Строение хромосферы более сложное. На снимках края Солнца видно, что хромосфера состоит из огромного количества отдельных светящихся струй вещества. Длина их составляет несколько тысяч, а ширина — несколько сотен километров. Скорость вещества в них несколько десятков километров в секунду. Вещество в этих струях поднимается вверх и растворяется в короне. В свою очередь, вещество короны может опускаться в хромосферу. Струи образуют более крупную структуру, называемую хромосферной сеткой. Последняя порождается конвекцией в глубоких слоях фотосферы.

4. Солнечная корона. Самые верхние слои атмосферы Солнца образуют солнечную корону (см. вклейку VI). В короне наблюдается интенсивное движение вещества. Типичным для короны образованием является шлем и корональный луч. Два взаимосвязанных объекта хорошо видны на рисунке. Это поток вещества, движущийся наружу. Его происхождение рассмотрено в следующем параграфе.

5. Температура и плотность вещества во внешних слоях Солнца. Плотность вещества в Солнце непрерывно уменьшается по мере удаления от его центра. Как показывают расчеты, в самом центре она велика и достигает $1,5\cdot10^5$ кг/м^3, но уже в фотосфере падает до 0,1 г/м^3 (10^{23} атомов в 1 м^3, что в 100 раз меньше, чем в земной атмосфере на уровне моря). В хромосфере она продолжает быстро падать и на границе с короной уже в 10^5 раз меньше, чем в фотосфере. На расстоянии в несколько радиусов Солнца корона плавно переходит в межпланетную среду.

Проследим за изменением температуры. В центре она достигает $1{,}6 \cdot 10^7$ К и постоянно уменьшается с удалением от центра, достигая минимума (около 4500 К) на границе фотосферы и хромосферы. Затем она повышается до 10 000 К в верхних слоях хромосферы и до 2 000 000 К в короне. Для объяснения такого хода температуры надо рассмотреть, чем же определяется температура в данной точке звезды.

Вещество звезды типа Солнца представляет собой идеальный газ (несмотря на высокую плотность вещества в центре звезды, его температура настолько высока, что вещество остается идеальным газом). Температура идеального газа определяется как мера средней энергии движения его частиц. Она же является мерой внутренней энергии и определяется балансом притока и оттока энергии.

Пока плотность достаточно велика (до нижнего уровня хромосферы), перенос энергии осуществляется лучистым переносом и конвекцией (см. § 26). Но уже на нижней границе хромосферы поглощение становится настолько малым, что бóльшая часть энергии излучения свободно проходит эти более высокие слои атмосферы, практически не отдавая энергию веществу. На этом уровне излучение уже не определяется температурой вещества.

Излучение света в разреженной среде происходит следующим образом: при неупругом столкновении двух атомов или атома с электроном часть энергии столкновения передается атому и возбуждает его. Возбужденный атом отдает энергию в виде светового излучения в одной из спектральных линий.

Очевидно, что интенсивность излучения, следовательно, и отток энергии пропорциональны квадрату числа частиц в единице объема или квадрату плотности (в столкновении участвуют две частицы). Конечно, это не значит, что температура не играет никакой роли. Чем выше температура, тем больше энергия сталкивающихся частиц и тем бóльшая энергия теряется в каждом столкновении. Но зависимость от температуры слабая. Если в плотном газе по закону Стефана—Больцмана интенсивность излучения пропорциональна T^4, то в разреженном газе она зависит от температуры в первой (или даже еще меньшей) степени. Таким образом, бóльшая яркость какого-нибудь объекта в хромосфере или короне говорит не о его более высокой температуре, а о его большей плотности.

Приток энергии в хромосфере и короне определяется уже не проходящим излучением, а распространением звуковых и так называемых магнитогидродинамических волн. Источником и тех и других являются конвективные движения в фотосфере и хромосфере. В хромосфере и короне они поглощаются и передают свою энергию частицам. Чем меньше плотность, тем больше энергии приходится на одну частицу и тем меньше энергии теряется. Это и обуславливает повышение температуры в хромосфере и короне[*].

6. Солнечный (звездный) ветер. Как оказалось, излучение не может полностью унести всю приносимую звуковыми магнитогидродинамическими волнами энергию, поэтому температура и давление газа в короне увеличиваются, и газ начинает расширяться в пространство, унося с собой избыточную энергию. Устанавливается постоянный поток вещества, скорость которого возрастает по мере удаления от Солнца. Наконец, вещество, разогнавшееся до второй космической скорости, покидает Солнце.

Солнечным ветром называется постоянное истечение плазмы солнечной короны в межпланетное пространство, воспринимаемое как непрерывный поток разреженной плазмы, движущийся от Солнца. Солнечный ветер уносит в год 10^{12} кг солнечного вещества, что означает потерю в год до 10^{-18} массы Солнца.

Аналогичный поток плазмы существует и у звезд (звездный ветер). Интенсивность его зависит от температуры поверхностных слоев звезды и звезд, температура которых намного превышает температуру Солнца; звездный ветер может уносить до $10^{-5}\ M_{\odot}$ в год.

§ 23. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И ЕЕ ЗЕМНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

1. Активные образования и активные области в солнечной атмосфере. На диске Солнца нередко видны необычные образования: участки пониженной яркости — солнечные пятна и повышенной яркости — факелы. На краю диска заметны выступы хромосферы — протуберанцы, иногда появляются короткоживующие очень яркие пятна-вспышки. Все они получили общее название — активные образования, а их появление и развитие — солнечная активность (см. вклейку VI). Солнечная активность — результат сложного взаимодействия локальных магнитных полей и солнечной плазмы.

Обычно активные образования возникают в так называемых активных областях Солнца. Эти области могут занимать значительную долю солнечного диска. Главная характеристика активных областей — выход на поверхность сильных локальных (т. е. местных) магнитных полей, намного более сильных, чем регулярное магнитное поле Солнца. Типичная для активной области схема магнитного поля представлена на рисунке 62.

---

[*] Конечно, это очень приблизительная картина, обрисовывающая только основную идею. Сама теория намного сложнее и требует для своего изложения весьма изощренной математики.

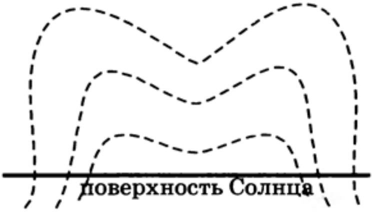


Рис. 62. Магнитное поле активной области.

2. Взаимодействие магнитного поля и плазмы. Плазма — полностью или частично ионизованный газ, в котором положительные и отрицательные заряды в среднем компенсируют друг друга, и плазма в целом остается нейтральной. Разреженная плазма в отсутствие магнитных полей практически не отличается от идеального газа. Наличие же магнитного поля сразу меняет картину. Для рассмотрения плазмы в магнитном поле воспользуемся картиной линий магнитной индукции.

Напомним, что эти линии проводятся так, что касательные к ним в любой точке определяют направление вектора магнитной индукции, а число линий на единицу площади перпендикулярной к ним площадки пропорционально модулю этого вектора. Поток вектора магнитной индукции равен числу линий магнитной индукции, пронизывающих контур.

Выделим в плазме произвольный контур. Наглядным образом его может служить сечение тонкой трубки, образованное линиями магнитной индукции. Попробуем изменить поток вектора магнитной индукции, пронизывающий контур. При этом в контуре из-за явления электромагнитной индукции возникнет ЭДС, направленная таким образом, чтобы препятствовать изменению магнитного потока, проходящего через контур. Поскольку сопротивление плазмы чрезвычайно мало (обычно его просто считают равным нулю), ЭДС должна быть бесконечно большой, т. е. поток просто не может измениться. Это положение называется принципом вмороженности магнитного поля.

Попытаться изменить поток магнитного поля можно двумя способами: во-первых, можно привести плазму в движение, но поскольку число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, не может измениться, то в этом случае они будут следовать за плазмой; во-вторых, можно усилить или ослабить магнитное поле, но в этом случае плазма придет в движение, контур растянется или сожмется в зависимости от ослабления или усиления поля. Создается впечатление, что линии магнитной индукции как бы следуют за плазмой, они приклеены или вморожены в плазму, что и объясняет название принципа. Следствием принципа вмороженности является то, что плазма может двигаться только вдоль линий магнитной индукции. Движение поперек невозможно.

Возникает вопрос: а как же магнитное поле попадает в плазму (или плазма в магнитное поле)? Это очень медленный и сложный процесс, когда плазма «просачивается» между силовыми линиями. К сожалению, рассмотрение этого вопроса требует знания математики в объеме, намного превышающем школьный курс.

3. Солнечные пятна. Солнце, как и другие небесные тела, вращается вокруг своей оси. Это дает возможность определить на нем полюсы и экватор и построить систему гелиографических координат (Гелиос — Солнце), полностью аналогичных географическим.

Часто по обе стороны экватора в полосе гелиографических широт 10—30° появляются солнечные пятна (см. вклейку VI) и факелы — светлые пятнышки, хорошо видные у пятен и у края диска (см. вклейку VI). В телескоп хорошо различаются темный овал пятна и окружающая его полутень. Обычно пятна появляются группами (см. вклейку VI). Характерный размер темного пятна около 20 000 км. Пятно на фоне фотосферы кажется совершенно черным, однако, поскольку в пятне температура равна 4500 К, его излучение слабее излучения фотосферы всего в 3 раза.

В пятне наблюдаются сильные магнитные поля (до 4,5 Тл). Именно наличие магнитного поля и определяет понижение температуры, поскольку оно препятствует конвекции и уменьшает тем самым поток энергии из глубинных слоев Солнца. Пятно появляется в виде чуть расширенного промежутка между гранулами — в виде поры. Примерно через сутки пора развивается в круглое пятно, а через 3—4 дня появляется полутень.

Со временем площадь пятна или группы пятен растет и через 10—12 дней достигает максимума. После этого пятна группы начинают исчезать, и через полтора-два месяца группа исчезает вообще. Часто группа не успевает пройти все стадии и исчезает в гораздо более короткие сроки.

4. Фотосферные факелы и флоккулы. Пятна обычно окружены сетью ярких цепочек — фотосферным факелом. Ширина цепочки определяется диаметром ее ярких элементов (типа гранул) и составляет около 500 км, а длина доходит до 5000 км. Площадь факела намного (обычно в 4 раза) превышает площадь пятна. Факелы встречаются и вне групп или одиночных пятен (см. вклейку VI). В этом случае они гораздо слабее и заметны обычно на краю диска. Это говорит о том, что факел представляет собой облако более горячего газа в самых верхних слоях фотосферы. Факелы относительно устойчивые образования. Они могут существовать в течение нескольких месяцев.

Над пятнами и факелами расположена флоккула — зона, в которой яркость хромосферы увеличена. Несмотря на увеличение яркости, флоккула, как и хромосфера, остается невидимой на фоне ослепительно яркого диска Солнца. Наблюдать ее можно только с помощью специальных приборов — спектрогелиографов, в которых получается изображение Солнца в излучении в длине волны спектральной линии. В этом случае изображение флоккулы выглядит темной полоской.

Вернемся к рисунку 62, когда в углублении, образованном линиями напряженности, скапливается плазма, из-за повышения плотности усиливается излучение, падает температура и давление, что, в свою очередь, приводит к повышению плотности и усилению излучения. Постепенно «ловушка» переполняется, и плазма по линиям напряженности стекает в фотосферу. Устанавливается равновесие: горячий газ короны попадает в «ловушку», отдает свою энергию и стекает в фотосферу. Так образуется флоккула. Когда вращение Солнца выносит флоккулу на край Солнца, мы видим висящий спокойный протуберанец (см. вклейку VI).

Преобразование магнитных полей может привести к тому, что линии напряженности выпрямляются и плазма флоккулы выстреливается вверх. Это эруптивный протуберанец (см. вклейку VI). При увеличении магнитного поля в фотосфере конвекция сначала даже усиливается. Не очень сильное магнитное поле тормозит турбуленцию и тем самым облегчает конвекцию. Но более сильное поле уже затрудняет конвекцию, и в месте выхода поля наружу температура падает — образуется солнечное пятно.

5. Вспышки. Если в плазме встречаются два магнитных поля противоположной полярности, то происходит аннигиляция полей. Аннигиляция (уничтожение) магнитного поля по закону Фарадея вследствие электромагнитной индукции вызывает появление сильного переменного электрического поля. Поскольку электрическое сопротивление плазмы мало, это вызывает мощный электрический ток, в магнитном поле которого запасается огромная энергия. Затем в взрывном процессе эта энергия выделяется в виде светового и рентгеновского излучений (рис. 61). Земной наблюдатель видит вспышку как яркую точку, неожиданно появляющуюся на диске Солнца, обычно вблизи группы пятен. Вспышку можно наблюдать в телескоп и в исключительных случаях невооруженным глазом.

Однако основная часть энергии выделяется в виде кинетической энергии движущихся в солнечной короне и межпланетном пространстве со скоростями до 1000 км/с выбросов вещества и потоков ускоренных до гигантских энергий (до десятков гигаэлектрон-вольт) электронов и протонов.

Проникающее в корону магнитное поле захватывается потоком солнечного ветра. При определенной конфигурации магнитного поля оно сжимает плазму, ускоряя ее до очень больших скоростей. Одновременно поток плазмы вытягивает линии магнитной индукции. Таким образом формируется коро-

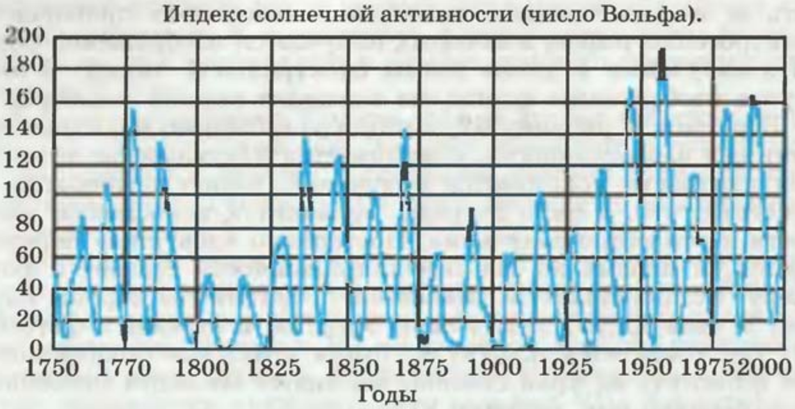


Рис. 63. Кривая чисел Вольфа.

нальный луч (см. § 22). Вспышки на Солнце оказывают сильное воздействие на ионосферу Земли, существенно влияют на состояние околоземного космического пространства. Имеются свидетельства влияния вспышек на погоду и состояние биосферы Земли. Поэтому изучение вспышек особо актуально.

6. Цикличность солнечной активности. Частота появления солнечных пятен циклически меняется с периодом около 11,2 лет. В начале каждого цикла на высоких гелиографических широтах появляются первые группы пятен. В течение 4—5 лет частота появления пятен повышается, затем несколько медленнее снижается. При этом пятна появляются все бли-

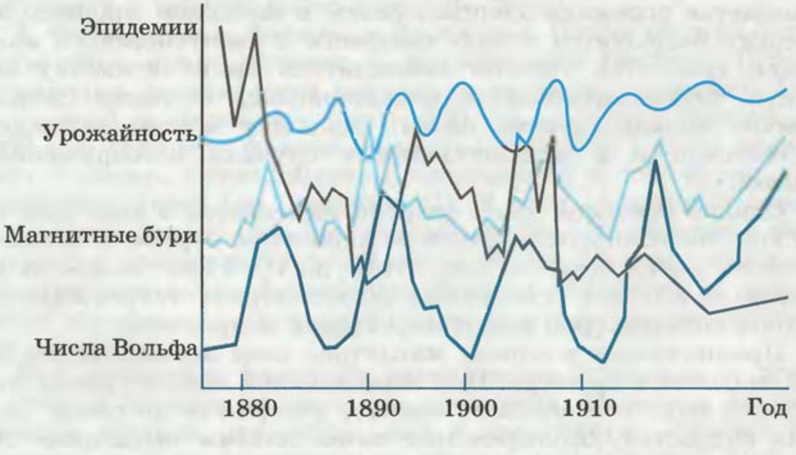


Рис. 64. Кривые взаимосвязи земных явлений с активностью Солнца.

же и ближе к экватору. Начало нового цикла знаменуется появлением высокоширотной группы.

Солнечную активность принято характеризовать числом Вольфа: $W=10g+\psi$, где ψ — число пятен, а g — число групп, в которые они объединяются. На рисунке 63 показана кривая изменения числа Вольфа за все время наблюдений.

Исследования показывают, что синхронно с солнечной активностью, характеризуемой числом Вольфа, изменяется уровень воды в закрытых водоемах, ширина годичных колец деревьев, число магнитных бурь и т. д. (рис. 64). Это подтверждается многочисленными наблюдениями и считается твердо установленным фактом, хотя сам механизм связи солнечной активности и ее земных проявлений пока неясен.

§ 24. ЗВЕЗДЫ

1. Светимости звезд. Звезды представляются нам светящимися точками. Одни из них видны лучше — они ярче, другие слабее, третьи едва различаются невооруженным глазом, четвертые (их абсолютное большинство) видны только в телескоп.

Единственной физической величиной, которой можно характеризовать звезду и которую можно измерить, является освещенность, создаваемая звездой на земной поверхности. Из оптики известно, что освещенность E, светимость звезды L и расстояние до звезды R связаны соотношением

$$E=\frac{L}{4\pi R^2}.$$

Освещенность, создаваемая самой яркой звездой Сириус на поверхности Земли, более чем в 10^{10} раз превышает освещенность, создаваемую самой слабой наблюдаемой звездой, но примерно во столько же раз меньше освещенности, создаваемой Солнцем.

Зная расстояние до звезды, измерив создаваемую ею освещенность, можно определить одну из основных физических ее характеристик — светимость. Оказалось, что светимости звезд разбросаны в весьма широких пределах. Светимость большинства звезд меньше солнечной (у самых маломощных в миллион раз), у самых больших и ярких звезд, называемых белыми или голубыми сверхгигантами, в десятки тысяч раз больше.

2. Температура, спектр и цвет звезд. Внимательный наблюдатель сразу заметит, что яркие звезды имеют разный цвет. Так, Вега (α Лиры) голубовато-белая, Альдебаран (α Тельца) красновато-желтая, Сириус (α Большого Пса) белая, Антарес (α Скорпиона) красная, Солнце и Капелла (α Возничего) жел-

Таблица 4

Температура, К	Основные линии в видимом спектре (химические элементы)	Цвет звезды	Представитель
35 000	He^+	Голубой	
25 000	He	Голубовато-белый	Вега (α Лиры)
10 000	H	Белый	Сириус (α Большого Пса)
6000	H, Ca^+	Желтый	Солнце
4500	Металлы, OH, TiO	Красный	Арктур (α Волопаса)
3500	Металлы, OH, TiO	Темно-красный	*R* Зайца

тые. Мы не видим цвет у более слабых звезд только из-за особенностей нашего зрения. Цвет звезды обусловлен ее температурой, что непосредственно следует из закона Вина (см. § 21, п. 2). Самые горячие звезды имеют температуру до 35 000 К. Максимум излучения у них лежит в далекой ультрафиолетовой области, и нам они кажутся голубыми. Звезды с температурой 10 000 К белые, с температурой 6000 К желтые, с температурой 3000—3500 К красные. От температуры зависит и спектр звезд. Основные данные о температуре, спектре и цвете звезд приведены в таблице 4.

3. Радиусы звезд. Энергия, испускаемая единицей поверхности звезды, определяется законом Стефана—Больцмана. Вся поверхность звезды равна $4\pi R^2$ (R — радиус звезды). Поэтому светимость звезды определяется выражением

$$L=4\pi R^2\sigma T.$$

Таким образом, если нам известны температура и светимость звезды, то мы можем вычислить и ее радиус. Угловые размеры дисков звезд намного меньше предельного угла для большинства существующих телескопов. Лишь используя самые большие телескопы и специальные способы наблюдений, удалось не только непосредственно измерить диаметры нескольких звезд, но и получить изображения их дисков.

Полученные значения радиусов звезд в целом совпадают с вычисленными по приведенной формуле светимости.

4. Взаимосвязи характеристик звезд. Диаграмма Герцшпрунга — Ресселла. Для понимания природы звезд важно выявить зависимости между их отдельными характеристиками. Такие связи находятся путем сопоставления соответствующих величин.

В начале XX в. датский астроном Э. Герцшпрунг и американский астрофизик Г. Ресселл установили одну из зависимостей и представили ее в виде диаграммы, носящей их имена. На горизонтальной оси диаграммы Герцшпрунга — Ресселла (диаграмма Г—Р) откладывают температуру звезды, а на вертикальной — ее светимость в солнечных единицах. Каждой звезде на диаграмме отвечает вполне определенная точка. Обычно говорят, что место на диаграмме занимает звезда, а не соответствующая ей точка, и при обсуждении эволюции звезд пишут: «звезда движется по диаграмме», подразумевая при этом, что в процессе эволюции звезды из-за изменений температуры и светимости звезды меняется положение соответствующей точки на диаграмме Г—Р.

Если бы между светимостями звезд и их температурами не было никакой зависимости, то звезды располагались бы на диаграмме Г—Р беспорядочно, однако (см. вклейку VII) большинство звезд сконцентрировано на диаграмме в узкой полосе, идущей от левого верхнего угла (звезды высокой температуры и большой светимости) к правому нижнему (звезды низкой температуры и малой светимости). Эта полоса называется *главной последовательностью*, а находящиеся на ней звезды — звездами главной последовательности или нормальными звездами. В месте, отмеченном вертикальной чертой, главная последовательность делится на верхнюю и нижнюю части. Звезды нижней части называются желтыми или красными карликами в зависимости от их температуры. Солнце типичный желтый карлик. Выше главной последовательности в области температур, меньших 6000 К, расположена полоса красных гигантов (светимостью 10^2—10^3 $L_\odot$ и радиусом 10—60 $R_\odot$) и красных сверхгигантов (светимостью 10^4 $L_\odot$ и радиусом 200—3000 $R_\odot$). Звезды горячие ($T \approx 30\,000$ К) и яркие ($L \approx 10^4$ $L_\odot$) называются белыми сверхгигантами, они занимают верхнюю часть главной последовательности.

В левом нижнем углу ($T \approx 10\,000$ К, $L \approx 10^4$ $L_\odot$ и $R \approx 0{,}01$ $R_\odot$) расположены белые карлики. Первый белый карлик был открыт в конце XIX в. Это был невидимый в небольшой телескоп спутник Сириуса — самой яркой звезды нашего неба. Он был назван белым карликом за свои малые размеры: его диаметр примерно равен диаметру Земли, зато масса мало отличается от массы Солнца. Впоследствии было открыто большое количество таких звезд, все они получили название белых карликов. Это особые звезды, и мы еще будем неоднократно возвращаться к ним.

Некоторые особенности спектров позволяют определить, имеем ли мы дело со звездой главной последовательности, белым карликом, гигантом или сверхгигантом. Так, белые карлики обладают спектром с очень широкими спектральными линиями, напротив, у гигантов и сверхгигантов линии узкие и очень узкие. Эти и некоторые другие особенности спектров дают возможность сразу поместить наблюдаемую звезду в нужную область диаграммы.

Итак, сопоставление только двух характеристик позволило выделить несколько обособленных групп звезд. Если учесть, что в этих группах закономерно изменяются и другие характеристики (например, вдоль главной последовательности слева направо уменьшаются массы и радиусы звезд), то становится ясным, что звезды в этих группах обладают одинаковым строением.

Строя диаграммы Г—Р для отдельных групп звезд, о которых известно, что они возникли одновременно, мы получаем возможность исследовать эволюцию звезд (подробнее об этом см. в § 33).

5. Массы звезд. Соотношение масса—светимость. Массы звезд лежат в очень узких пределах. Если светимости звезд лежат в пределах от $L \approx 10^{-4} L_{\odot}$ до $L \approx 10^{4} L_{\odot}$, радиусы — в пределах от $0{,}01\ R_{\odot}$ до $3 \cdot 10^{3} R_{\odot}$, то массы звезд лежат в пределах от $0{,}02\ M_{\odot}$ до $100\ M_{\odot}$. Тело меньшей массы уже не является звездой, а большей не может существовать. Такая звезда неустойчива и уже при возникновении либо сбросит избыточную массу, либо распадется на две или несколько.

Сопоставление масс, радиусов и светимостей звезд главной последовательности показывает, что между этими величинами существуют два соотношения, выполняющиеся с очень большой точностью. Если выражать характеристики звезд в солнечных единицах, то

$$L = M^{3{,}9}, \ R = M^{0{,}75}.$$

Первое соотношение масса—светимость (см. вклейку VII) дает возможность определить массы звезд главной последовательности, не входящих в двойные системы. Для белых карликов соотношение масса—радиус имеет совершенно другой вид (о нем подробнее см. в § 26).

§ 25. ДВОЙНЫЕ И ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ

1. Двойные и кратные звезды. Еще в XVIII в. В. Гершель заметил, что две звезды, расположенные на очень близком расстоянии, обращаются одна вокруг другой. Так были открыты двойные звезды. Позже были обнаружены кратные системы, в которые входят три, четыре и даже шесть звезд. Наиболее известна пара звезд Алькор (средняя звезда ковша Большой Медведицы) и Мицар. Но это пример оптической двойной. Эти звезды просто случайно видны практически в одном направлении. В системе Алькор—Мицар звезда с меньшим блеском находится в несколько раз дальше от нас, чем более яркая. Интересно, что светимость этой звезды в действительности больше, чем более яркой. Примером физической (или истинной) двойной является звезда ε Лиры (левая в нижнем углу традиционного рисунка созвездия). Как двойную ее видят люди с очень острым зрением, для остальных необходим хотя бы бинокль.

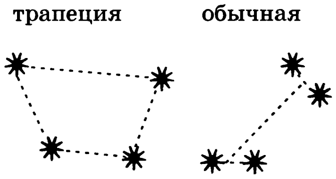


Рис. 65. Четверные системы.

Звезд, двойственность которых можно обнаружить невооруженным глазом или в телескоп, не так много. Значительно больше таких двойных, у которых расстояния между компонентами настолько малы, что невозможно увидеть их раздельно. Для их обнаружения нужны исследования спектров.

Некоторые двойные системы обнаруживаются астрометрическими методами. Так, например, была открыта двойственность ярчайшей и одной из ближайших к нам звезды Сириус. Было обнаружено, что Сириус движется не по прямой линии (точнее, не по дуге большого круга, который играет роль прямой на сфере), а периодически отклоняется от нее. Это было интерпретировано как наличие довольно большого спутника с массой, примерно равной массе Солнца. Действительно, как только появился достаточно мощный телескоп, то такой спутник (первый белый карлик) был открыт.

Двойных звезд очень много: не менее 60% всех звезд входит в двойные системы. Кратных систем намного меньше. Среди них выделяются два типа: трапеция и обычные (рис. 65). В системах типа трапеция расстояния между всеми звездами практически одинаковы, в обычных системах образуется несколько пар, расстояния внутри которых намного меньше расстояний между парами. Установлено, что системы типа трапеция неустойчивы и они либо быстро превращаются в обычную систему, либо распадаются. Таким образом, если мы наблюдаем трапецию (например, в туманности Ориона), то можно утверждать, что эти звезды образовались совсем недавно, не более чем несколько миллионов лет назад.

В двойных системах движение происходит относительно центра масс. Поскольку движение периодическое, то и лучевая скорость каждой компоненты периодически меняется (рис. 66).

При приближении к нам она отрицательна, при удалении положительна, поэтому спектральные линии каждой компоненты будут периодически смещаться то к красному, то к синему концу спектра. Причем движение это должно происхо-

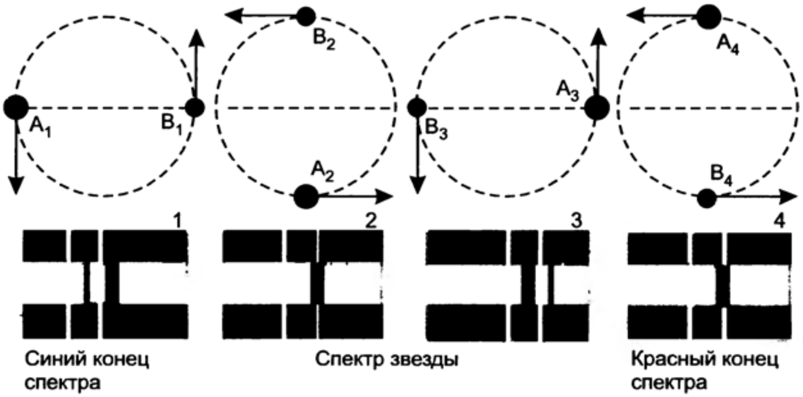


Рис. 66. Эффект Доплера в двойной системе (светлые линии — опорные в спектре лабораторного источника излучения; *1—4* — последовательные конфигурации звезд *A* и *B*).

дить в противофазе, т. е. если линии одной звезды смещаются к красному, то другой — к синему концу спектра. Иногда одна звезда настолько слабее другой, что видна только одна система линий. Но этого достаточно, чтобы определить кривую скоростей и орбиту звезды, а значит, и массу системы. Изучению двойных, особенно тесных, пар в настоящее время уделяется особое внимание. В некоторых случаях наблюдения тесных двойных звезд позволяют получить информацию не только о их массах, но и о форме поверхности, о распределении температуры по поверхности, изучить процессы, происходящие в их атмосферах. В тесных двойных системах наблюдаются газовые диски. К этим особенностям двойных звезд мы вернемся в § 33, когда будем рассматривать эволюцию звезд.

В том случае, если плоскость орбиты двойной звезды проходит через Землю (или угол между лучом зрения и плоскостью орбиты был достаточно мал), периодически одна звезда закрывает другую. В системе происходит затмение. Суммарная яркость двойной системы уменьшается; нам кажется, что изменяется светимость звезды.

Звезды, изменяющие свою светимость (видимую яркость, блеск, видимую звездную величину), называются переменными звездами.

График этого изменения называется кривой блеска. Она хорошо характеризует звезды и играет основную роль в их классификации. В названии типа приводится название либо первооткрытой, либо наиболее типичной звезды с такой же кривой блеска (например, Цефиды названы по звезде δ Цефея). Кривая блеска для Алголя (β Персея) представлена на рисун-

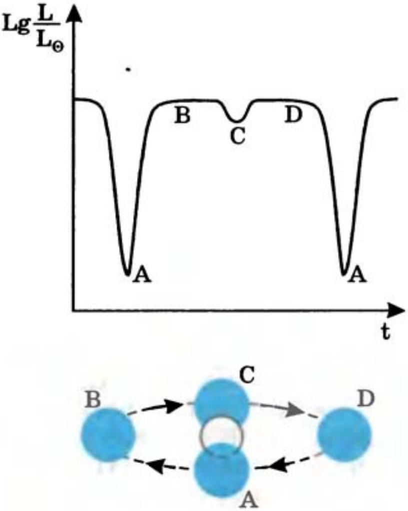


Рис. 67. Алголь, кривая блеска и схема переменности.

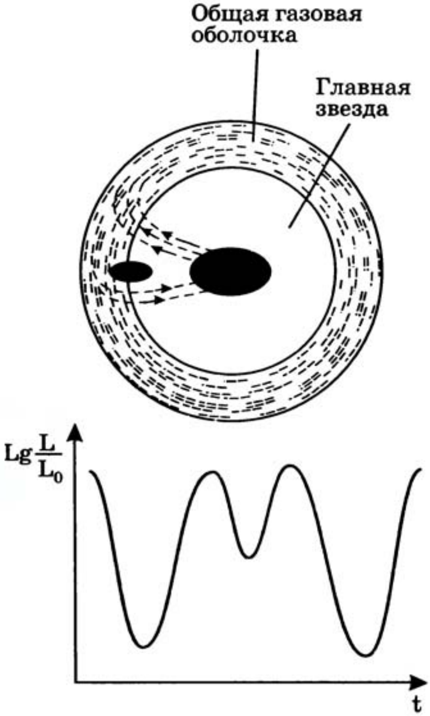


Рис. 68. Схема строения и кривая блеска переменной типа β Лиры.

ке 67. Алголь представляет собой тесную пару, состоящую из красного гиганта и звезды главной последовательности. Период переменности около 70 ч. Главный минимум соответствует затмению звезды главной последовательности. Увеличение светимости перед вторичным минимумом, который соответствует затмению гиганта, объясняется отражением света более яркой звезды главной последовательности от поверхности звезды-гиганта. Такие переменные называются алголями.

На рисунке 68 представлены схемы строения и кривая блеска другой затменно-переменной типа β Лиры. Ее период всего 12 ч. Звезды настолько близки друг к другу, что деформированы приливными силами и практически касаются друг друга. Из главной звезды вытекает газ, образующий общую для обеих звезд оболочку. Изменения блеска обусловлены не только затмением, но и тем, что при вращении системы мы видим сечения звезд разной площади (они не шары, а вытянутые эллипсоиды).

2. Физические переменные звезды. Большинство переменных звезд меняет свою светимость в результате процессов, происходящих в самой звезде. Эти процессы происходят в верхних слоях звезд или в их фотосферах (за исключением сверхновых, весьма условно отнесенных к переменным).

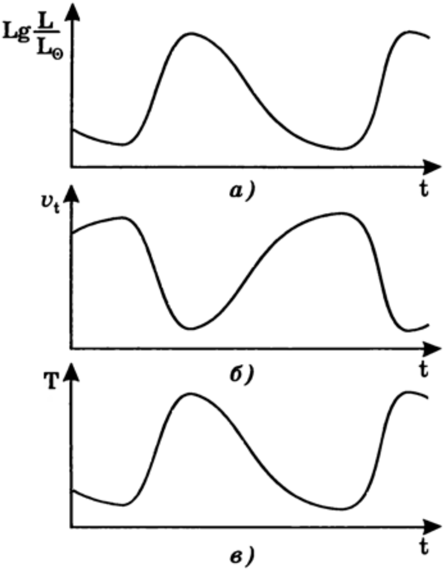


Рис. 69. Кривые переменной типа δ Цефея и звезд типа RR Лиры (*а* — кривая блеска; *б* — кривая лучевой скорости; *в* — кривая температуры).

Физические переменные можно разделить на неправильные и периодические. У неправильных изменения светимости происходят хаотически, в них невозможно проследить никакой периодичности. Типичными представителями таких звезд являются τ Тельца и *RV* Кита. На диаграмме Г—Р они расположены в области красных гигантов и в промежутке между красными гигантами и главной последовательностью. Они относятся к молодым, т. е. недавно образовавшимся, звездам. По-видимому, их переменность связана с явлениями, аналогичными солнечной активности (см. § 23), только масштабы этих явлений гораздо больше.

Периодические переменные расположены на верхнем краю левой части главной последовательности. Изменения их светимости связаны с периодическими пульсациями звезды. Типов периодических переменных очень много, и мы остановимся только на одном их них, наиболее изученном и представляющем особый интерес. Это цефеиды.

О том, что цефеида — пульсирующая звезда, говорит согласованность кривых блеска, кривых лучевых скоростей и кривой изменения температуры (рис. 69). Согласно современным теориям в звездах большой массы (около 8 $M_\odot$) в процессе эволюции (см. § 33) создаются условия для возникновения автоколебаний. Когда верхние слои расширяются, в них падает температура и начинается рекомбинация ионизованного гелия.

При рекомбинации выделяется энергия, что замедляет падение температуры и давления; это, в свою очередь, поддерживает расширение внешних слоев, пока закончится рекомбинация гелия. Приток энергии прекращается, и звезда начинает сжиматься. Но сжатие приводит к увеличению температуры и ионизации гелия. В результате давление повышается не так быстро, и сжимающиеся слои проскакивают точку равновесия. Сжатие прекращается, как только весь гелий ионизуется. Давление поднимается, и цикл повторяется.

Особый интерес цефеиды вызывают потому, что у них четко выражена зависимость период—светимость (рис. 70). Определив по наблюдениям период колебания цефеиды (благодаря специфичности кривой блеска цефеиды легко отождествляются), можно определить и ее светимость, а поскольку известна интенсивность приходящего к нам излучения звезды, то известно и расстояние до нее. Цефеиды — звезды-гиганты с огромной светимостью, их можно обнаружить в далеких галактиках. Это дает возможность определять расстояния до других галактик.

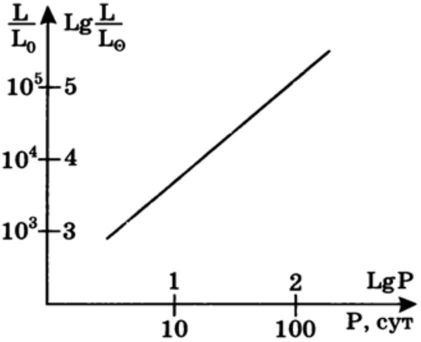


Рис. 70. Диаграмма период—светимость для цефид и звезд типа RR Лиры.

3. Новые и сверхновые звезды. Довольно условно к переменным звездам относятся новые и сверхновые. Получили они свои названия потому, что в древности неоднократно замечали появление звезды, которой раньше не было видно. Такие звезды быстро разгорались и через некоторое время исчезали. В древности считалось, что это появление новой звезды.

В начале XX в. на старых фотографиях удалось найти несколько звезд, которые впоследствии стали новыми. Эти звезды неожиданно в очень которое время, за 2—3 сут., внезапно увеличивали свою светимость в 10^4—10^5 раз. Спектральные наблюдения новых начинались непосредственно перед максимумом блеска или непосредственно после него. Тем не менее удалось довольно быстро описать само явление новой звезды.

Новая появляется тогда, когда звезда начинает расширяться со скоростью до 800—1200 км/с. При этом расширяются только ее верхние слои. Светимость звезды резко возрастает. После достижения максимума светимости падение температуры поверхности приводит к тому, что блеск звезды уменьшается. В этот момент внешние слои звезды отрываются от нее и образуют расширяющуюся оболочку.

Через некоторое время плотность оболочки падает настолько, что она становится прозрачной. Непрерывный спектр исчезает, и мы видим уже очень горячую звезду, а вокруг нее появляется светящаяся оболочка, имеющая массу около $10^{-5}\ M_\odot$. Через несколько лет оболочка рассеивается в пространстве, звезда остывает и возвращается к первоначальному состоянию (механизм взрыва мы рассмотрим в § 33).

Ежегодно в нашей галактике вспыхивает до 30 новых, хотя наблюдается лишь малая их часть. Это означает, что далеко не каждая звезда может вспыхнуть как новая. Теоретические расчеты показывают, что повторная вспышка новой может произойти примерно через 3000 лет. Поэтому в галактике должно быть около 10 000 звезд, способных вспыхнуть как новая. Наше Солнце, как мы увидим позже, вспыхнуть как новая не может.

Уже в самом конце XIX в. в туманности Андромеды были обнаружены вспышки новых. Но скоро стало ясно, что это гораздо более мощное явление, названное вспышками сверхновых.

Внешне картина явления новых и сверхновых практически одинакова. Но при более внимательном изучении этого феномена понятно, что мы наблюдаем различные явления.

Во время вспышки сверхновой ее светимость возрастает в 10^7—10^8 раз за время около 15 сут. При вспышке сверхновой звезда также сбрасывает оболочку, скорость расширения которой достигает 6000—10 000 км/с, а масса — в 2—5 раз и более масс Солнца. После вспышки сверхновой образуется расширяющаяся туманность, которая не рассеивается, а, наоборот, увеличивает свою массу, увлекая за собой межзвездный газ. После вспышки остается либо нейтронная звезда, либо черная дыра (о них подробнее позже). В редких случаях на месте сверхновой не остается ничего. Так, сверхновая 1092 г., отмеченная в китайских летописях как звезда, видимая днем, оставила после себя нейтронную звезду, масса которой около 2,5 $M_\odot$, и Крабовидную туманность (см. форзац II).

При вспышке новой выделяется энергия, превышающая 10^{31} Дж, что равно энергии, выделяемой Солнцем за 10 000 лет. А при вспышке сверхновой выделяется 10^{45} Дж энергии, что сравнимо с запасом энергии в звезде. Отсюда можно сделать вывод, что после вспышки новой звезда не претерпевает существенных изменений, во время вспышки сверхновой полностью меняет свое строение (мы вернемся к новым и сверхновым звездам в § 33).

4. Пульсары. В 1967 г. совершенно неожиданно были открыты пульсары — источники периодически возникающих радиоимпульсов очень малой длительности. Строгая периодичность привела сначала к мысли, что открыт искусственный радиоисточник. Однако открытие сразу нескольких пульсаров, в частности пульсара в Крабовидной туманности, привело к заключению, что это нейтронная звезда. Дальнейшие исследования показали, что пульсары излучают не только в радиодиапазоне, но и в видимой и рентгеновской частях спектра. При этом оказалось, что наибольшая энергия излучается именно в рентгеновском диапазоне.

Пульсар представляет собой нейтронную звезду диаметром в несколько километров, обладающую исключительно сильным магнитным полем (10^6 Тл). В таком поле генерируется излучение, выходящее в узком конусе у магнитного полюса. Нейтронная звезда вращается с угловой скоростью в несколько или несколько десятков оборотов в секунду, что и обусловливает строгую периодичность импульсов пульсара (более подробно механизм пульсаров мы рассмотрим в § 33).

§ 26. ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВНУТРИ ЗВЕЗД. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ЗВЕЗД

1. Давление и температура в центре звезды. Для решения вопроса о природе звезд, их строении и эволюции необходимо прежде всего определить физические условия в их недрах. Никаких данных наблюдений об этих условиях мы не имеем, так как единственный носитель информации о звездах — приходящее к нам излучение — полностью формируется в их фотосферах.

Мы можем утверждать, что звезды очень стабильные образования (переменность почти всегда поверхностный эффект, кроме того, время существования звезды как переменной мало). Во всяком случае, геологические данные говорят о том, что за последние 2 млрд лет светимость Солнца менялась не более чем на 5%.

Поскольку звезды — стабильные образования, давление в каждой точке должно компенсироваться весом вышележащих слоев с большой точностью. Очевидно, что разность давлений в каждом слое должна быть направлена наружу, т. е. давление, как и температура, возрастает к центру.

Рассмотрим небольшой элемент газа, ограниченный двумя сферическими поверхностями радиусами k_1 и k_2 ($r_1 - r_2 << r_2$) и цилиндром площадью основания S (рис. 71). На этот цилиндр действует сила, равная:

$$F_д = p_1S - p_2S = (p_1 - p_2)S,$$

где p_1 и p_2 — давления соответственно на уровнях верхнего и нижнего оснований цилиндра.

Поскольку $p_1 > p_2$, ясно, что сила, действующая на элемент газа, направлена наружу. Эта сила уравновешивается силой тяжести, которая по закону всемирного тяготения равна:

$$F_т = \frac{GM_rV\rho}{r^2},$$

где $r = \frac{r_1 + r_2}{2}$; M_r — масса вещества внутри сферы радиусом r; ρ — плотность вещества внут-

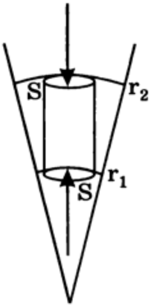


Рис. 71. К объяснению внутреннего строения звезд.

ри цилиндра; $V=S(r_2-r_1)$ — объем цилиндра (знак «−» показывает, что сила направлена к центру звезды). Приравнивая обе силы, получаем

$$\frac{p_1-p_2}{r_2-r_1}=G\frac{M_r\rho}{r^2}.$$

Это уравнение называется уравнением гидростатического равновесия. Чтобы представить себе давление в центре звезды, примем, что $r_2=R$, $M_r=M_*$ (индекс «*» показывает, что величина относится к звезде в целом), $p_2=0$ (поверхность звезды), $r_1=0$, $p_1=p_ц$ (центр звезды). Для плотности примем ее среднее значение $\rho=\bar{\rho}=\frac{M_*}{4/3\pi R^3}$. Подставив эти величины в предыдущую формулу, получим

$$p_ц=\frac{GM_*}{R}\bar{\rho}.$$

Для Солнца это выражение дает значение центрального давления, равное $2\cdot10^{12}$ Па.

Для определения температуры в центре звезды воспользуемся уравнением Менделеева—Клапейрона:

$$p=\frac{A}{\mu}\rho T,$$

где μ — средняя молярная масса вещества; A — универсальная газовая постоянная. Заменив p выражением для центрального давления, получим

$$T_ц=\frac{G\mu}{A}\,\frac{\bar{\rho}}{\rho_ц}\,\frac{M_*}{R}.$$

Подставляя сюда $\mu=0{,}5\cdot10^{-2}$ кг/моль (значение для ионизованного водорода) и полагая, что $\frac{\bar{\rho}}{\rho_ц}=0{,}01$, получаем для Солнца $T_{ц\odot}=2\cdot10^7$ К.

Это значение мало отличается от найденного точным расчетом (12—14 млн кельвин). При таких температурах и давлениях вещество полностью ионизовано и находится в состоянии идеального газа.

Сделанные оценки достаточно грубые, однако они дают возможность установить, что в центрах звезд температура превышает 10^7 К и существенно возрастает с увеличением массы звезды, что вещество в звезде является идеальным газом и оно полностью ионизовано.

2. Запас энергии в звезде. Оценим, как долго может светить Солнце за счет запаса внутренней энергии. Будем считать, что полученная выше оценка для центральной температуры звезды по порядку величины не отличается от среднего значения температуры в звезде. Тогда полная внутренняя энергия звезды равна:

$$V=\frac{3M_*}{2\mu}AT=\frac{3GM^2_*\bar{\rho}}{2r_*\rho_ц},$$

что для Солнца даст значение $V_\odot=10^{41}$ Дж.

Ежесекундно звезда теряет количество энергии, равное ее светимости, поэтому время свечения звезды за счет внутренней энергии равно для Солнца:

$$\tau_{\odot}=10^{15}c=10^{8} \text{ лет},$$

что существенно меньше времени существования Земли. Таким образом, в звезде должны происходить процессы выделения энергии, или, как принято говорить в астрономии, должны существовать источники энергии.

3. Гравитационное сжатие. В астрофизике существенны только два процесса выделения энергии, которые могут поддерживать свечение звезды, — это гравитационное сжатие и термоядерные реакции. Рассмотрим первый процесс.

Пусть в некоторый момент времени из-за охлаждения звезды температура в ее центре несколько понизится. Давление в центре тоже понизится и уже не будет компенсировать вес вышележащих слоев. Силы гравитации начнут сжимать звезду. При этом потенциальная энергия системы уменьшится (так как потенциальная энергия отрицательна, то ее модуль увеличится). Из приведенной выше формулы внутренней энергии звезды видно, что при этом внутренняя энергия, а значит, и температура внутри звезды увеличатся. Но на повышение температуры потратится только половина выделившейся потенциальной энергии, другая половина пойдет на поддержание излучения звезды.

Теорема вириала (см. § 10, п. 1) утверждает, что потенциальная энергия по модулю в 2 раза больше кинетической энергии любой системы, в которой действуют гравитационные силы. Поскольку в нашем случае кинетическая энергия — это сумма кинетических энергий частиц идеального газа, или внутренняя энергия газа, то ясно, что при сжатии звезды половина выделившейся за счет сжатия гравитационной энергии расходуется на поддержание светимости, а половина — на увеличение запаса внутренней энергии (повышение температуры). Это означает, что за 10^8 лет радиус Солнца должен был уменьшиться примерно в 2 раза. При этом температура поверхности Солнца должна была существенно увеличиться, что противоречит геологическим данным, согласно которым средняя температура на Земле не менялась на протяжении $1{,}5\cdot10^9$ лет, т. е. гравитационное сжатие не может поддерживать свечение Солнца на протяжении достаточно большого промежутка времени.

Другое положение для белых карликов. Эти звезды имеют радиусы и светимости, примерно в 100 раз меньшие солнечных. Очевидно, что время сжатия (а следовательно, время, в течение которого сжатие может служить основным источником энергии) на 4—6 порядков больше, т. е. достигает 10^{12}—10^{14} лет, что больше современного возраста Вселенной.

Аналогичная ситуация, т. е. ситуация, когда гравитационное сжатие является существенным или даже единственным источником энергии, возникает на некоторых этапах эволюции звезд (эти случаи рассмотрены в § 33).

4. Термоядерные реакции — основной источник энергии звезд. При высоких температурах, которые существуют в недрах звезд, происходят термоядерные реакции, в ходе которых в результате слияния ядер атомов выделяется энергия.

В центральных областях звезд главной последовательности протекают реакции преобразования водорода в гелий, как говорят, происходит горение водорода (конечно, ничего общего не имеющее с химическим горением). Оно может происходить двумя различными путями. Первый путь — протон-протонная цепочка — осуществляется при низких температурах: от $14 \cdot 10^6$ до $15 \cdot 10^6$ К. Он начинается с того, что два протона сливаются, образуя ядро дейтерия, дейтерий поглощает еще один протон, превращаясь в изотоп гелия (Не), конец цепочки — образование ядра гелия.

Второй путь — углеродно-азотный цикл — осуществляется при температурах от $18 \cdot 10^6$ до $20 \cdot 10^6$ К и содержит ряд ядерных реакций. Начинается он с того, что протон сливается с ядром атома углерода, образуя ядро азота, а заканчивается тем, что образовавшееся ядро атома кислорода распадается на ядро атома углерода и ядро атома гелия. Конечно, эти пределы температуры достаточно условны, реакции того или иного цикла происходят и при более высоких температурах; речь идет только о температурах, при которых подавляющая часть энергии выделяется именно в данной реакции.

До недавнего времени еще сохранялись сомнения в правильности гипотезы о термоядерных источниках, хотя результаты расчетов по этой гипотезе прекрасно подтверждались наблюдениями. Но в 1993 г. начал работу нейтринный телескоп, способный регистрировать нейтрино, возникающее при слиянии двух ядер водорода в ядро дейтерия. Результаты первых экспериментов показали, что регистрируется примерно вдвое меньше нейтрино, чем ожидалось.

Как известно, существует три вида нейтрино: электронное (ν_e), мюонное (ν_μ) и тау-нейтрино (ν_τ). Согласно некоторым теориям элементарных частиц нейтрино могут превращаться друг в друга. Эксперимент, поставленный в 2000—2001 гг., проходил на двух установках (их часто называют нейтринными телескопами). В одной из них (в Садбери) регистрировалось только электронное нейтрино, в другой (японская установка Супер-Камиоканде) — все виды нейтрино. Солнце испускает исключительно электронные нейтрино. Оказалось, что Супер-Камиоканде регистрирует примерно на 30% меньше ожидаемого количества нейтрино. Но в Садбери регистрируют еще примерно на 1/3 меньше, т. е. регистрируемый на

Земле поток солнечных нейтрино содержит не только электронные нейтрино! Значит, по дороге к Земле часть электронных нейтрино превратилась в другие виды нейтрино (мюонное или тау). Это снимает противоречие наблюдений и теории ядерных источников энергии.

Возможность таких превращений предсказывалась, но для их осуществления необходимо, чтобы нейтрино имело массу. А такое предположение, в свою очередь, противоречит многим фундаментальным физическим теориям. Так что необходимо продолжение исследований.

При преобразовании 1 кг водорода в гелий выделяется энергия, равная 10^{14} Дж. Поскольку мощность излучения Солнца равна $4 \cdot 10^{26}$ Вт, а масса водорода в нем составляет $2 \cdot 10^{30}$ кг, то запаса водорода в Солнце хватит на 100 млрд лет; конечно, не весь водород может выгореть, а только тот, который сосредоточен в центральных областях, но и его хватит на 10—15 млрд лет. В звездах с большей светимостью запас водорода израсходуется гораздо быстрее.

При температурах, больших чем 10^8 К, и плотностях порядка 10^9 кг/м^3 и больше возможны ядерные реакции, в которых три ядра гелия сливаются в ядро углерода. Правда, это осуществимо только на поздних стадиях эволюции звезды, когда в ее ядре уже полностью исчерпываются запасы водорода и вещество практически полностью состоит из гелия. При больших температурах и плотностях в термоядерных реакциях участвуют все более и более тяжелые элементы, вплоть до железа. С железом и более тяжелыми элементами термоядерные реакции не происходят, так как в них энергия уже не выделяется, а поглощается.

Следует отметить, что скорость выделения энергии в термоядерных реакциях сильно зависит от температуры. Так, в протон-протонной цепочке скорость выделения энергии пропорциональна T^4, в углеродно-азотном цикле — T^{17}, в тройной гелиевой реакции — T^{30}.

§ 27. МОДЕЛИ ЗВЕЗД

1. Устойчивость звезд. Темпы основных процессов, которые происходят в звездах, значительно отличаются. Самый медленный процесс — горение ядерного топлива. Химический состав очень массивных и горячих звезд существенно изменяется только в течение не менее миллиона лет, а Солнца — не менее миллиарда лет. Это время называется ядерным ($\tau_я$). Выделившаяся в центре звезды энергия достигает ее поверхности за 10^5—10^7 лет (чем больше температура звезды, тем быстрее), это время называется тепловым ($\tau_т$). Наконец, механическое возмущение — изменение давления или плотности — распространяется в звезде за гидродинамическое время ($\tau_г$), которое может изменяться от нескольких часов до нескольких дней.

Соотношение $\tau_я \gg \tau_т \gg \tau_г$ показывает, что звезда находится в равновесии. Она всегда успевает «подстроиться» к любому изменению в ее недрах.

2. Построение моделей звезд. Используя известные физические законы, можно получить представление о том, что происходит в недрах звезды. Для этого строятся модели звезд. Модель представляет собой математическое описание строения звезды. Это таблицы, в которых описывается распределение плотности и температуры в зависимости от радиуса. Такие таблицы позволяют вычислить все наблюдаемые характеристики звезды, которая описывается этой моделью, и сравнить полученные результаты с наблюдаемыми параметрами изучаемой звезды (например, Солнца).

В начале расчета делаются некоторые предположения о состоянии вещества в звезде, о процессах, в ней происходящих, записываются уравнения используемых физических законов, которые решаются с помощью ЭВМ. В результате мы получаем таблицу чисел, которые описывают распределение температуры и плотности в звезде в зависимости от расстояния от ее центра.

Предполагается, что звезда находится в равновесии, т. е. в любой ее точке давление уравновешивает силы гравитации. Описывается это положение уравнением гидростатики (см. п. 1 этого параграфа). Вторым важнейшим уравнением является уравнение переноса энергии (см. § 27, п. 3). Вся энергия вырабатывается в центральных областях звезды. Конвекция или лучистый перенос транспортируют выделившуюся энергию к поверхности звезды, где она излучается в пространство. В различных областях звезды действуют разные уравнения переноса энергии, что создает немалые трудности при вычислении.

Следующее основное уравнение описывает процесс выделения энергии. Это — уравнение ядерной физики. Хотя сами процессы достаточно хорошо известны, но их ход исследован только в земных лабораториях. При этом исследуются процессы, происходящие при очень высоких энергиях, соответствующих температурам, в сотни и тысячи раз большим, чем в недрах звезд. А скорость и течение этих процессов очень сильно зависят от энергии сталкивающихся частиц.

Наконец, уравнение, показывающее, как меняется химический состав вещества в результате происходящих ядерных реакций.

Решение уравнений дается в безразмерных переменных: T/T_c и ρ/ρ_c. После вычисления модели, задав массу и химический состав, подбираются значения T_c и ρ_c так, чтобы получить заданные значения светимости L и радиуса R. После этого можно сравнивать полученные результаты с наблюдениями, соответственно уточнять модели и делать заключения о строении звезд и их эволюции.

Эволюция звезды рассчитывается следующим образом. Задав определенные значения массы и химического состава, оценивают исходную модель. Обычно эта модель определяется в предположении, что химический состав вещества звезды во всех ее точках одинаков. Затем задают некоторый промежуток времени и рассчитывают, как изменился химический состав в различных местах звезды в результате ядерных реакций, после чего снова рассчитывают новую модель звезды с уже изменившимся химическим составом.

3. Основные модели звезд. *а) Модель полностью конвективной звезды.* Во всей звезде перенос энергии осуществляется конвекцией. Источник энергии — гравитационное сжатие — соответствует только что возникшей звезде. На диаграмме Г—Р звезда, построенная по этой модели, находится в области красных гигантов и между этой областью и главной последовательностью. Конвекция обеспечивает эффективное перемешивание вещества, поэтому химический состав звезды однороден. Модель описывает звезду на ранней стадии эволюции.

б) Модель звезды нижней части главной последовательности ($M < 1{,}4\ M_{\odot}$). Источником энергии служит горение водорода в протон-протонной цепочке. Температура в центре 12—14 млн кельвин. Передача энергии в центральных областях осуществляется излучением (лучистая зона). Примерно на расстоянии, равном половине радиуса, прозрачность вещества уменьшается настолько, что лучистый перенос «не справляется», и возникает конвекция (конвективная оболочка). По мере сгорания водорода гелий накапливается в центральных частях, так как там температура выше и термоядерные реакции происходят быстрее, но принципиальных изменений модели нет. На диаграмме Г—Р звезда, построенная по этой модели, находится вблизи и на главной последовательности в нижней ее части. Представитель этого типа звезд — Солнце.

в) Модель звезды верхней части главной последовательности ($M > 1{,}4\ M_{\odot}$). Температура в центре звезды составляет 17—20 млн кельвин, горение водорода осуществляется в углеродно-азотном цикле. Темп выделения энергии очень высок, и в центре образуется конвективное ядро, которое окружено лучистой оболочкой.

Высокий темп выгорания водорода приводит к тому, что в центральной части звезды накапливается гелий, и химический состав звезды перестает быть однородным.

г) Модели с неоднородным химическим составом. Это модели массивных звезд главной последовательности и красных гигантов, т. е. звезд, находящихся на поздних стадиях эволюции. Характерной их особенностью является наличие слоевых источников энергии, когда в центре звезды полностью исчерпывается водород, образуется гелиевое ядро, на поверхности которого продолжается горение водорода.

Более сложные модели (это модели звезд большой массы на поздних стадиях эволюции) могут иметь несколько слоевых источников энергии, каждый из которых отделяет зоны с различным химическим составом. Так, переходя все к более глубоким слоям звезды, мы пересечем первый слоевой источник, отделяющий богатую водородом внешнюю оболочку звезды от слоя чистого гелия. На нижней границе этого слоя горит гелий (реакции 3He=>C и C+He=>O), слоевой источник отделяет от гелиевого слоя слой смеси углерода и кислорода, в нижней части которого происходит реакция C+O=>Mg, и т. д. В такой модели может чередоваться и несколько конвективных и лучистых зон.

д) Модель белого карлика. Белый карлик обладает очень высокой плотностью вещества ($\rho \approx 10^9 - 10^{11}$ кг/м^3). При таких плотностях газ уже не является идеальным. В полностью ионизованном веществе белого карлика как бы сосуществуют два газа: ионный, обладающий свойствами идеального газа, и электронный, обладающий свойствами вырожденного газа. Давление в белом карлике обеспечивается электронным газом, и оно зависит исключительно от плотности вещества.

Звезда находится в равновесии, если гравитационное давление равно давлению газа. Гравитационное давление $p_g \sim \frac{GM^2}{R^4}$, давление вырожденного газа $p \sim \rho^{5/3}$, тогда при равновесии $\frac{GM^2}{R^4} \sim \rho^{3/2} = \left(\frac{GM}{R^3}\right)^{5/3} \sim \frac{M^{5/3}}{R^5}$. Отсюда следует, что равновесие возможно, если $R \sim M^{-1/3}$, т. е. при увеличении массы радиус белого карлика уменьшается.

Но свойства вырожденного газа при некоторой критической плотности меняются так, что при больших плотностях меняется уравнение состояния, т. е. изменяется зависимость давления от плотности. Теперь она будет такой: $p \sim \rho^{4/3}$. Но при этом равенство гравитационного и газового давлений возможно только при определенном значении массы. Предельная масса белого карлика оказывается равной

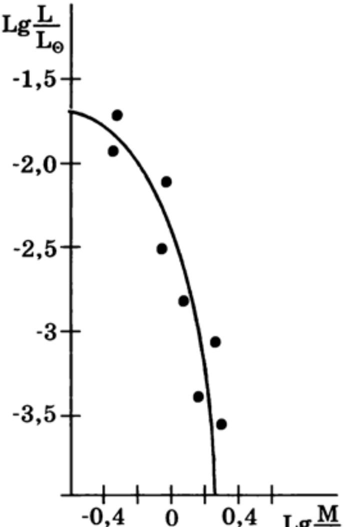


Рис. 72. Диаграмма масса—радиус для белых карликов.

примерно 1,4 $M_\odot$. Зависимость радиуса от массы показана на рисунке 72.

В белом карлике плотность значительно увеличивается к центру, температура же благодаря высокой теплопроводности вырожденного газа повышается очень медленно. При достижении плотности более 10^{12} кг/м^3 в центре белого карлика может образоваться кристаллическое (твердое) ядро.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Опишите физические условия в каждой из оболочек Солнца.

2. Что такое солнечная активность и как она связана с явлениями на Земле?

3. Что такое диаграмма спектр—светимость?

4. Опишите основные модели звезд.

5. Используя закон Стефана—Больцмана, определите температуру солнечного пятна, если энергия, излучаемая единицей его поверхности, в 2,57 раза меньше, чем излучаемая фотосферой.

6. Определите положение максимума излучения в спектре звезды, температура которой равна 4200 К. Положение максимума излучения в спектре Солнца 533 нм.

7. Почему температура короны очень высокая?

8. Поверхностные температуры трех звезд равны соответственно 4500 К, 6000 К, 10 000 К. Определите отношение светимостей, если радиусы этих звезд относятся как 100:1:0,005.

9. Оцените температуру в центре звезды, масса которой в 20 раз, а радиус в 10 раз больше радиуса Солнца. Отношение средней плотности к центральной примите равным 0,01.

10. Масса звезды равна 10 $M_\odot$, всего может выгореть 20% запасенного в ней водорода. На какой срок хватит ей запаса ядерного горючего? Светимость оцените по диаграмме масса—светимость.

Глава VI

МИР ГАЛАКТИК

§ 28. НАША ГАЛАКТИКА

1. Форма и размеры Галактики. В ясную безлунную ночь наше внимание привлекает слабосветящаяся туманная полоса, пересекающая все небо, — Млечный Путь (см. вклейку VIII). Внимательный наблюдатель сразу отметит его сложную клочковатую структуру и неодинаковую в разных местах яркость. Телескопические наблюдения показывают, что Млечный Путь представляет собой совокупность огромного числа слабых звезд.

Еще в XVIII в. В. Гершель предположил, что Млечный Путь представляет собой гигантскую звездную систему — Галактику (древнегреческое название Млечного Пути) и предложил метод исследования его структуры. Метод заключается в подсчете звезд определенной яркости, видимых в данном направлении. Переходя ко все более и более слабым звездам, мы подсчитываем число звезд, находящихся на все больших и больших расстояниях. Сопоставляя подсчеты, сделанные в разных направлениях, можно получить представление о форме, размерах и строении нашей звездной системы. Гершель считал, что все звезды обладают одинаковой светимостью, равной светимости Солнца. Так как большинство звезд действительно имеет светимость, близкую к солнечной, его результаты не слишком отличаются от современных, в которых светимость звезд учитывается более точно. Если речь идет о нашей звездной системе, то Галактика — имя собственное и пишется с большой буквы; если говорится о других звездных системах, то галактика — имя нарицательное и пишется с маленькой буквы.

Галактика — гигантская звездная система. Ее диаметр около 30 кпк (30 000 пк), а общая масса видимой материи около 10^{41} кг, или 10^{11} масс Солнца. Галактику окружает так называемая галактическая корона, состоящая из огромного числа звезд малой массы ($M \approx 0{,}3-0{,}2\ M_\odot$).

Бóльшая часть звезд Галактики сосредоточена в объеме, напоминающем по форме линзу, диаметр которой равен диаметру Галактики (30 000 пк, или 30 кпк), а толщина не превышает 4 кпк. Эта область называется галактическим диском, вдоль его плоскости симметрии — галактической плоскости — располагаются тонким слоем (≈200 пк) газовые и газопылевые облака. В целом строение Галактики подобно строению других спиральных галактик (рис. 73). Солнце расположено вблизи галактической плоскости примерно в 8 кпк от центра Галактики.

Красные карлики, шаровые скопления, красные гиганты, короткопериодические цефеиды образуют сферическую составляющую Галактики. Они занимают сферический объем, и их концентрация быстро увеличивается к центру. О распределении звезд короны мы практически ничего не знаем, но наиболее вероятно, что они распределены в сферическом объеме радиусом в несколько раз больше, чем радиус Галактики.

В самом центре Галактики располагается ее ядро. Оно закрыто от нас огромным облаком поглощающей материи, поэтому исследуется только в инфракрасном свете и радиоизлучении. Процессы в ядре Галактики изучены плохо. В самом центре или непосредственно рядом с ним обнаружен источник нетеплового (т. е. не связанного с горячим газом) радиоизлучения, природа которого неясна. В пределах 300 пк от цент-

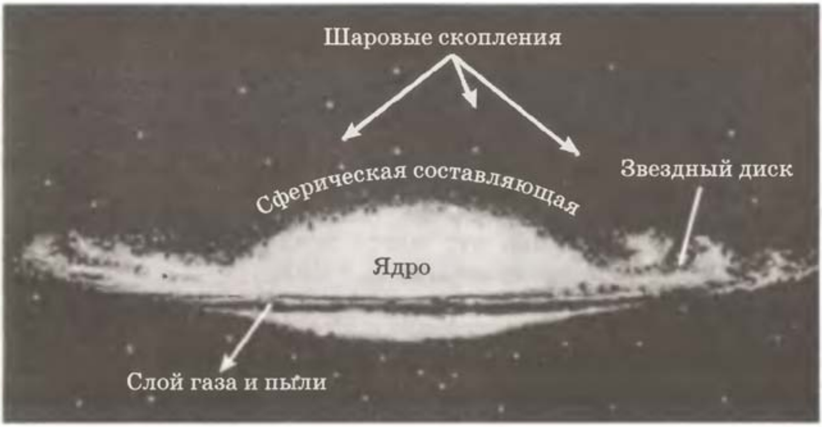


Рис. 73. Строение Галактики.

ра обнаружено множество признаков образования массивных звезд. Там имеется газовый диск, масса которого, возможно, достигает 50 млн масс Солнца. Диск вращается с очень большой скоростью, причем вдоль его оси из ядра выбрасывается довольно значительное количество газа.

Недавно получены данные, свидетельствующие о наличии в Галактике массивной (несколько миллионов масс Солнца) черной дыры. Черные дыры наблюдаются, когда на ее поверхность падает газ (в галактиках это межзвездный газ). При падении на дыру газ разогревается до миллионов кельвин и светится в рентгеновском диапазоне. В Галактике, по-видимому, несколько миллионов лет назад произошло падение на черную дыру массивного тела. Это вызвало мощнейший взрыв, в результате которого межзвездный газ выбросило из окрестностей черной дыры.

2. Вращение Галактики. Исследования собственных движений звезд в Галактике показывают, что галактический диск вращается. Период вращения для разных расстояний от центра различен (т. е. Галактика вращается не как твердое тело). Для Солнца и окружающих его звезд он равен примерно 180 млн лет. Линейная скорость вращения при удалении от центра сначала быстро возрастает, затем на очень большом

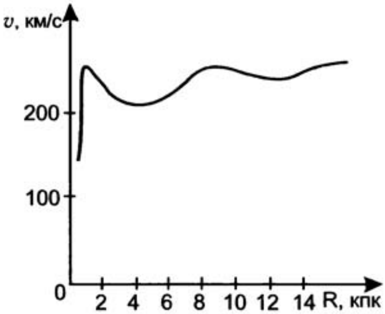


Рис. 74. Распределение линейных скоростей вращения в отдельных галактиках.

расстоянии остается постоянной или даже увеличивается. Аналогичное распределение скоростей вращения характерно и для других галактик (рис. 74).

Такая зависимость скорости вращения звезд от расстояния до центров галактик не согласуется с наблюдаемым распределением звезд, что и привело к заключению о существовании у галактик ненаблюдаемых галактических корон. Многочисленные наблюдения скоростей галактик в их скоплениях привели к заключению, что масса ненаблюдаемой материи в 10 раз превышает массу видимых звезд.

Природа этой массы остается неизвестной. Начиная с 1993 г. проводятся исследования короны нашей Галактики. Применяется для этого особый метод, возникший с развитием техники наблюдений. Такой метод называется методом микролинзирования. Основан он на том, что звезда своим гравитационным полем отклоняет свет, проходящий от более далекого объекта, а поскольку звезда представляет собой сферически симметричное тело, она играет роль положительной линзы.

Теперь представим себе, что между очень удаленной звездой и наблюдателем проходит некое тело с массой, сравнимой с массой Солнца. В результате микролинзирования мы увидим, что яркость этой звезды увеличится. Для нас это будет неожиданная вспышка наблюдаемой звезды. Конечно, такое событие будет достаточно редким. Но если наблюдать одновременно много звезд, то можно увидеть такое событие.

Современные приемники излучения в сочетании с мощными ЭВМ позволили провести такие исследования звезд ближайшей к нам галактики — Большого Магелланова Облака. Удалось зафиксировать достаточно много вспышек, чтобы прийти к выводу, что они вызваны микролинзированием звезд массами 0,2—0,3 $M_{\odot}$. Непосредственно наблюдать такие звезды на этих расстояниях мы не можем: они слишком слабы. Но общая масса звезд короны, по-видимому, слишком мала (не более 30%), чтобы объяснить, из чего состоит галактическая корона. Кроме того, нужно отметить, что не совсем понятно, как образовалось столь большое количество звезд малой массы в периферийных областях Галактики.

Открытие короны не приводит к существенному изменению наших представлений о строении внутренней части Галактики и о процессах, которые там происходят. Оно значительно только для оценки таких величин, как средняя плотность вещества во Вселенной. В дальнейшем, говоря о Галактике, мы будем говорить о тех объектах, которые мы можем наблюдать обычными средствами.

(К вопросу о скрытой массе мы вернемся еще раз в § 31.)

§ 29. ОБЪЕКТЫ НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

1. Звездные скопления. Часть звезд Галактики входит в звездные скопления, представляющие собой системы, состоящие из большого количества звезд (от нескольких десятков до нескольких миллионов), связанных силами взаимного тяготения. Скопление движется в Галактике как единое целое, что говорит и об общем одновременном происхождении звезд, его составляющих.

Скопления делятся на рассеянные и шаровые (см. вклейку VIII). Рассеянные скопления содержат от нескольких десятков до нескольких тысяч звезд. Расположены они в полосе Млечного Пути, т. е. принадлежат диску Галактики. Из-за малой массы и достаточно больших размеров рассеянные скопления под действием притяжения других звезд Галактики постепенно распадаются, и их звезды сливаются со звездами фона. Время существования рассеянных скоплений не превышает 10^9 лет, а возраст известных скоплений лежит в пределах от десятков миллионов до полмиллиарда лет. Эти оценки хорошо подтверждают общее и одновременное происхождение звезд скопления.

Шаровые скопления содержат уже сотни тысяч и миллионы звезд. Они очень компактны, и силы взаимного притяжения намного превышают притяжение остальных звезд Галактики. Поэтому шаровые скопления вполне устойчивы. Это самые старые объекты Галактики — их возраст не менее 10^{10} лет, что практически совпадает с возрастом Галактики. Всего в нашей Галактике насчитывается около 200 шаровых и несколько тысяч рассеянных скоплений.

2. Межзвездная среда. Гравитационная неустойчивость. Еще в начале XX в. Р. Трюмбель обратил внимание на то, что удаленные от нас звезды имеют более красный цвет, чем звезды с таким же спектром, но расположенные ближе. Так, было установлено, что в межзвездном пространстве содержится довольно большое количество мелкой пыли (размеры пылинок порядка микрона), которая состоит из небольших силикатных и железных частиц.

Существование межзвездного газа было доказано спектроскопическим методом. В спектрах многих звезд обнаружены «лишние» спектральные линии, несомненно, принадлежащие межзвездной среде. Более того, было установлено, что огромные светлые туманности (размеры которых достигают сотен парсек) состоят из ионизованного газа.

Бóльшая часть массы межзвездного газа сосредоточена в облаках межзвездного газа. Появление облаков объясняется тем, что однородная газовая среда неустойчива. Действительно, если в газе неожиданно возникнет возмущение, т. е. в каком-то месте случайно увеличится плотность, то газовое давление будет стремиться возвратить газ в первоначальное состояние, но этому будут препятствовать силы гравитации. Силы давления практически не изменяются с увеличением размеров сжимающейся области. Силы гравитации возрастают с увеличением ее объема, поэтому образование, большее некоторого объема, обязательно начнет сжиматься.

Очевидно, что большие флуктуации возникают реже меньших, поэтому однородная среда обязательно разобьется на отдельные фрагменты (облака), размеры которых определятся равенством сил давления и сил гравитации. Очевидно, что, чем меньше плотность и чем больше температура газа, тем больше размеры фрагментов и тем больше их масса. Столь же очевидно, что уменьшение или увеличение плотности может привести либо к распаду облака на более мелкие фрагменты, либо к его сжатию.

3. Газовые и газопылевые облака. Межзвездный газ состоит из водорода и гелия с небольшой примесью всех остальных элементов. Наибольший интерес представляют холодные газовые облака. В них водород находится в нейтральном состоянии. Облака обнаруживают по излучению в радиодиапазоне, главным образом по излучению водорода в длине волны 21 см.

Линии поглощения нейтрального водорода лежат в далекой ультрафиолетовой области спектра. А это значит, что вещество туманности практически прозрачно для видимого излучения и туманность не нагревается светом большинства звезд.

При достаточно низких температурах (порядка 80 К) в газе начинают появляться молекулы, что приводит к дальнейшему понижению температуры, поскольку молекулы излучают уже в инфракрасном диапазоне. Это излучение свободно покидает туманность. Одновременно в такой туманности появляются пылинки. Они также способствуют понижению температуры. В результате образуется так называемое гигантское молекулярное облако — ГМО. Мелкомасштабные конденсации в нем, судя по всему, дают начало звездным скоплениям, а малые уплотнения — отдельным звездам.

В плотных холодных частях ГМО образуются и более сложные, чем водород, молекулы. Их известно сейчас свыше 300, в том числе такие сложные, как муравьиная кислота, и даже одна из аминокислот — глицин.

Газопылевые облака обнаруживаются нами, так как они закрывают свет звезд, расположен-

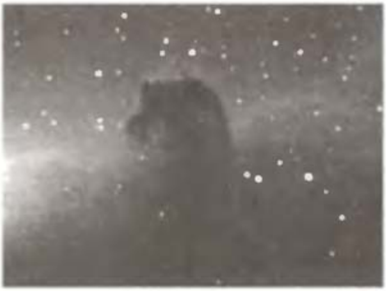


Рис. 75. Темная туманность Конская Голова.

ных дальше. Обычно они называются темными туманностями (рис. 75).

4. Светлые туманности. ГМО имеют размеры от 1 до 100 пк. Это значит, что они могут содержать не один десяток звезд. Если это звезды типа Солнца, то их присутствие ничего не меняет. Для видимого света газ прозрачен, а энергии, излучаемой звездой, недостаточно, чтобы нагреть и испарить пылинки.

Но если в ГМО появляется массивная звезда, а такие облака и являются местом, где рождаются звезды, то картина меняется. Прежде всего в области, близкой к звезде, исчезает пыль, и газовое облако становится прозрачным. Кроме того, массивная горячая звезда бо́льшую часть своей энергии излучает в далекой ультрафиолетовой части спектра. Газ нейтрального и молекулярного водорода непрозрачен для этой части спектра. При поглощении ультрафиолета водород ионизуется, причем оторвавшийся электрон обладает большой кинетической энергией, в результате чего повышается температура и давление внутри облака и уплотняются еще неионизованные облака газа. Повышение плотности приводит к дальнейшей фрагментации облака и распространению процесса звездообразования.

Повышение температуры также приводит к ионизации водорода и включению механизма переработки ультрафиолетового излучения звезд в видимый свет. Облако начинает светиться, и появляется светлая диффузная туманность.

В веществе туманности не только происходит процесс ионизации, но и непрерывно идет обратный процесс — процесс рекомбинации. При рекомбинации электрон обязательно попадает на один из высоких энергетических уровней. Серией каскадных переходов электрон непременно перейдет на второй уровень, при этом будет узлучен квант серии Бальмера, т. е. квант, соответствующий одной из линий в видимом диапазоне спектра. Чаще всего это будет красная линия H_α. Такой механизм свечения в видимом свете характерен для большинства светлых туманностей. Бальмеровский квант свободно уходит из туманности (для поглощения его необходимо наличие атомов водорода, у которых электрон находится на втором уровне, но таких атомов очень мало, так как электрон на втором уровне через 10^{-8} спонтанно переходит на первый.)

Наконец, еще один механизм свечения туманностей. Он осуществляется в волокнистых туманностях (см. форзац II), остатках сверхновых (см. Крабовидную туманность на форзаце II), пульсарах, рентгеновских источниках. Во всех этих объектах существуют значительное магнитное поле и быстродвижущиеся электроны. Движение очень быстрого (релятивистского) электрона в магнитном поле сопровождается специфическим излучением, названным синхротронным, поскольку было впервые обнаружено в мощных ускорителях элементарных частиц — синхротронах.

К светлым туманностям относятся (хотя их природа и другая) планетарные туманности (см. форзац II). Это небольшие светлые туманности, которые видны либо в виде светящегося кольца, либо в виде диска, подобного диску Урана или Нептуна (отсюда название). Это небольшие газовые облака размерами не более 0,1 пк и массами около 0,1 $M_{\odot}$. Они представляют собой оторвавшуюся оболочку красного гиганта. В центре ее находится очень горячая звезда, которая, остывая, превращается в белый карлик. Светит планетарная туманность, преобразуя ультрафиолетовое излучение горячей звезды в видимый свет. Планетарная туманность — недолговечное образование: она расширяется и распадается в течение нескольких десятков тысяч лет.

Распределение цветов на фотографии планетарной туманности позволяет сделать некоторые выводы о ее строении. Внутренняя часть туманности заполнена очень горячим газом (более 40 000 К). Водород в этой области полностью ионизован. Свечение обусловлено излучением атомов трижды ионизованных кислорода и азота. Такие атомы излучают в так называемых «запрещенных линиях». В этих ионах при столкновениях с электроном электрон часто попадает на уровень, переход с которого «запрещен» (происходит с очень малой вероятностью). В земных условиях такой переход осуществляется без излучения, поскольку избыточную энергию ион отдает при столкновениях. В крайне разреженном газе планетарной туманности столкновения крайне редки и «запрещенный» переход все же происходит.

В желтых областях температура несколько ниже, многократно ионизованных атомов кислорода и азота мало и свечение происходит главным образом в желтой линии ионизованного гелия. Наконец, в красных областях температура еще ниже, там светит водород в самой сильной красной линии H_{α}.

Впечатление кольца возникает по той же причине, почему край Солнца кажется нам резким. Луч зрения, который направлен к нам от центральной звезды, проходит тонкий слой, оптическая толщина которого оказывается очень малой. Луч зрения, который направлен по краю сферического газового облака, проходит в этом слое значительно больший путь, оптическая толщина на этом направлении оказывается достаточно большой.

5. Спиральная структура Галактики. Исследования распределения в пространстве белых и голубых сверхгигантов, зон ионизованного водорода и ГМО показывают, что в Галактике существует выраженная спиральная структура, хорошо соответствующая спиральным структурам других галактик. Очень хорошо спиральная структура видна на рисунках форзаца II.

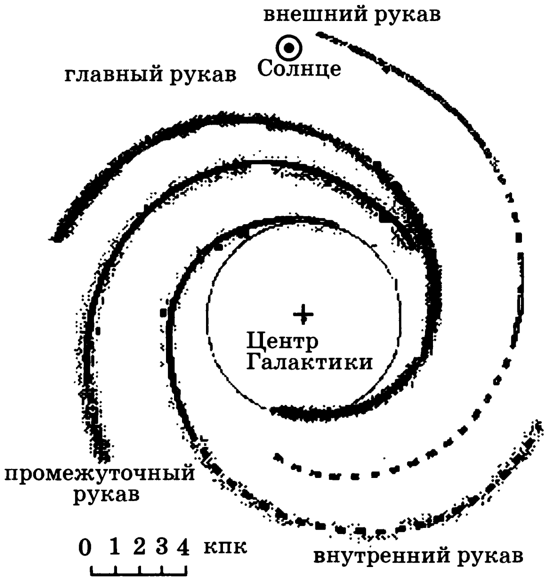


Рис. 76. Спиральная структура Галактики (⊙ — положение Солнца; + — центр Галактики).

В нашей Галактике спиральная структура состоит из нескольких спиральных рукавов (рис. 76). Они представляют собой волны плотности, распространяющиеся в сторону, противоположную вращению Галактики (точнее, ее диска). Концентрация звезд в волне увеличивается незначительно, но реакция межзвездной среды достаточно велика. Разгоняясь в гравитационном поле звезд, газ ускоряется, и его плотность может увеличиться в несколько раз. Увеличение плотности в ГМО приведет к тому, что газ начнет сжиматься. В облаке начнется процесс звездообразования. В первую очередь образуются звезды-гиганты (просто потому, что их образование и эволюция происходят значительно быстрее). Таким образом, спираль будет отличаться повышенной концентрацией облаков нейтрального и молекулярного газа с той стороны спирали, с которой он втекает в волну, и большим количеством ярких звезд с противоположной стороны.

§ 30. ГАЛАКТИКИ

1. Определение расстояний до галактик. Галактики настолько далеки от нас, что непосредственное определение расстояний до них (измерение параллакса) невозможно. Однако уже в 20-х гг. XX в. удалось увидеть в туманности Андромеды отдельные цефеиды. Поскольку светимость цефеид определяется по ее периоду (см. § 25), это дало возможность вычислить расстояние до туманности Андромеды. Еще раньше тем же методом были определены расстояния до Большого и Малого Магеллановых Облаков. Раздвинуть пределы, в которых можно оценивать расстояния до галактик, удалось после разработки статистических методов.

2. Закон Хаббла. В 1929 г. выдающийся американский астроном Э. Хаббл обнаружил, что все галактики удаляются от нас, причем скорость удаления тем больше, чем дальше они находятся. Проявляется это в том, что все линии из-за эффекта Доплера смещаются в красную сторону (рис. 77). Как оказалось, это смещение было предсказано А. А. Фридманом и

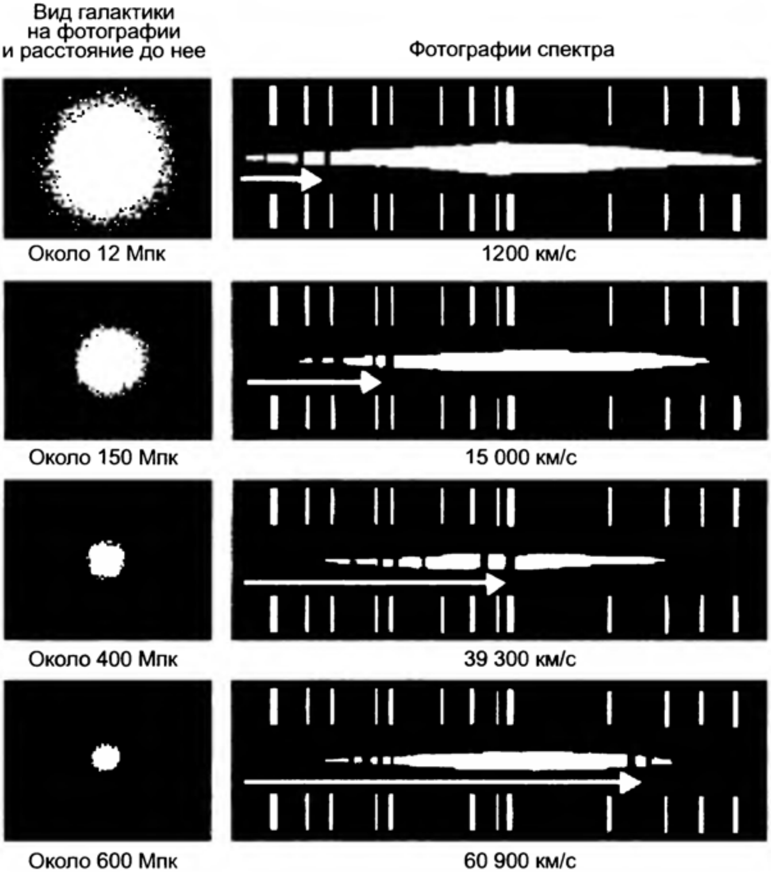

Вид галактики на фотографии и расстояние до нее
Фотографии спектра
Около 12 Мпк
1200 км/с
Около 150 Мпк
15 000 км/с
Около 400 Мпк
39 300 км/с
Около 600 Мпк
60 900 км/с

Рис. 77. Красное смещение галактик. (Слева помещены фотографические изображения галактик, имеющих приблизительно одинаковые размеры; справа — их спектры со спектрами сравнения. Стрелки указывают красное смещение, соответствующее данной скорости удаления.)

следует из теории относительности (см. § 31). Поэтому такое явление было названо «красное смещение».

Скорость удаления, по Хабблу, связана с расстоянием выражением

$$v = Hr,$$

где v — скорость удаления, выраженная в километрах в секунду (км/с); r — расстояние, выраженное в мегапарсеках; H — постоянная Хаббла, имеющая по современным данным значение 85 км/(с·Мпк).

3. Основные типы галактик. Мир галактик представляет нам невообразимое разнообразие индивидуальных форм. Несмотря на это, можно выделить несколько основных типов галактик.

Более половины всех известных галактик относится к типу спиральных (S). Все они отличаются выраженным ядром и отходящими от него спиральными ветвями, которые аналогичны спиральным ветвям нашей Галактики. В них много газа и пыли, происходит процесс звездообразования, о чем говорит большое количество белых и голубых сверхгигантов, сосредоточенных в ветвях.

Существует два типа спиральных галактик: обычные и пересеченные (см. форзац II). Отличаются они местом, где начинаются спирали. В обычных галактиках они начинаются непосредственно у ядра. В пересеченных галактиках начало спиралей находится на концах странного образования, называемого перемычкой (баром). Поэтому пересеченные спирали часто называются «барретспирали». Чем вызваны эти различия, не вполне ясно. Существует гипотеза, что это одна из ранних стадий развития спиральных галактик, что подтверждается некоторыми расчетами.

Среди спиральных галактик встречаются гиганты (Галактика, туманность Андромеды), массы которых достигают 10^{12} $M_{\odot}$, и карлики массами около 10^{8} $M_{\odot}$, светимости их лежат в пределах от 10^{34} до 10^{37} Вт.

Около трети галактик относится к типу эллиптических (этот тип галактик обозначается буквой E с добавлением цифр, показывающих сжатие, 0—7). Такая галактика видится кружком или овалом без выраженной внутренней структуры с небольшим увеличением яркости к центру. В эллиптических галактиках нет пыли и газа, а самые яркие звезды — красные гиганты. Среди эллиптических галактик встречаются сверхгиганты массами до 10^{12} $M_{\odot}$ и светимостями до 10^{38} Вт и карлики массами 10^{8} $M_{\odot}$ и светимостями до 10^{31} Вт.

Все остальные галактики относятся к неправильным (см. форзац II). В этих галактиках много пыли и газа, продолжается процесс звездообразования. Массы и светимости у них, как у карликовых спиральных и эллиптических галак-

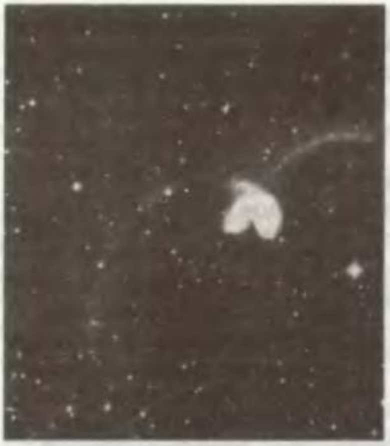


Рис. 78. Взаимодействующие галактики.

тик. К неправильным относятся и взаимодействующие галактики. Это две близко расположенные галактики, формы которых искажены приливными силами (рис. 78). В отдельных случаях можно предполагать, что мы видим столкновение или слияние галактик. Так, на рисунке форзаца II показана галактика M51, на конце спиральной ветви которой висит еще одна галактика. Не исключено, что мы наблюдаем поглощение меньшей галактики большей. Как часто осуществляется такой процесс, мы не знаем, но не исключено, что в те времена, когда образовывались галактики, этот процесс играл важную роль.

Тип галактики не связан с ее эволюцией, т. е. галактика одного типа в процессе эволюции не может превратиться в галактику другого типа. Различие в спиральных и эллиптических галактиках заложено с момента образования и, по-видимому, объясняется вращением. Спиральные вращаются быстро, эллиптические — медленно или вообще не вращаются. Чем обусловлено появление неправильных галактик, пока неясно.

4. Скопления галактик. Большинство (около 90%) галактик входит в группы (до десятков объектов) и скопления (до сотен и тысяч объектов). Наиболее исследована Местная группа, в которую входят наша Галактика, туманность Андромеды, вероятно, сверхгигантская эллиптическая галактика, закрытая от нас ГМО в Галактике, и около 30 карликовых эллиптических и неправильных галактик, расположенных в радиусе около 1,5 Мпк. На расстояниях до 20 Мпк найдено еще около 20 групп галактик.

Ближайшее к нам скопление в Деве размером около 50 Мпк (рис. 79) содержит около 200 только галактик высокой и средней светимости. Другие хорошо изученные скопления расположены в созвездиях Волос Вероники (расстояние 125 Мпк) и Северной Короны (350 Мпк). Самое далекое скопление, также находящееся в Волосах Вероники, удалено от нас на расстояние 5200 Мпк.

Скопления создают еще более грандиозные структуры (рис. 80) — сверхскопления, размеры которых около 60 Мпк. Общее число галактик, входящих в сверхскопления, по-видимому, превышает 20 000. Всего сейчас известно около 50 сверхскоплений. Они расположены в «стенках» некоей, еще не впол-

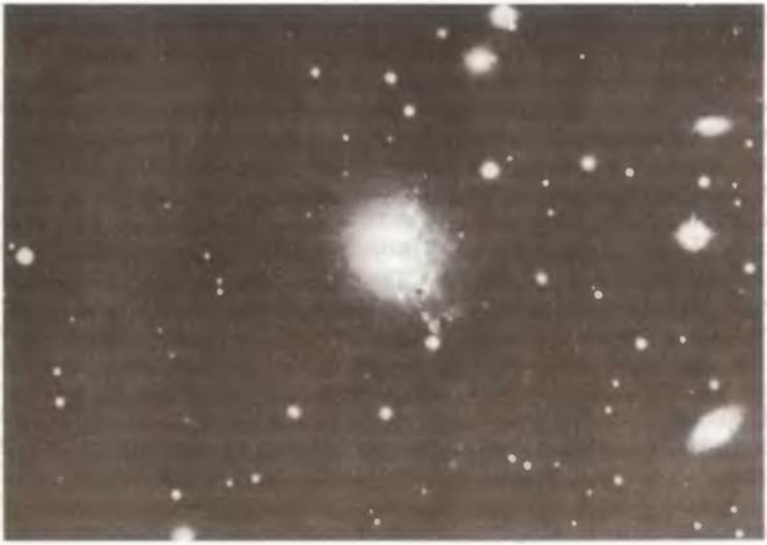


Рис. 79. Скопление галактик в Деве.

не уверенно просматриваемой ячеистой структуры, внутри ячеек ничего (?) нет.

5. Активные галактики. Особое внимание привлекают в настоящее время исследования активных галактик. Их открытие связано с развитием радиоастрономии. При первом же радиообзоре неба было обнаружено несколько сотен компактных радиоисточников (сейчас их более 10 000). Фотографирование областей неба, где они находятся, позволило отождествить значительную часть из них с далекими галактиками (остальные принадлежат Галактике — это остатки сверхновых).

Самыми слабыми радиоисточниками оказались спиральные

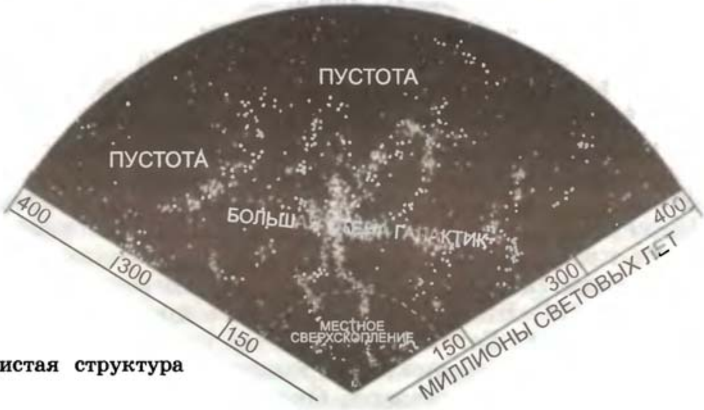

ПУСТОТА
ПУСТОТА
БОЛЬШАЯ СТЕНА ГАЛАКТИК
МЕСТНОЕ СВЕРХСКОПЛЕНИЕ
400
300
150
400
300
150
МИЛЛИОНЫ СВЕТОВЫХ ЛЕТ

Рис. 80. Ячеистая структура Вселенной.

и эллиптические галактики (мощностью излучения 10^{32} и 10^{35} Вт в диапазоне дециметровых волн, что на 3—5 порядков меньше, чем мощность излучения в видимом свете). Но у некоторых галактик мощность радиоизлучения вдвое превышает мощность излучения в видимом диапазоне и в миллион раз больше мощности обычной галактики в радиодиапазоне. При этом спектр радиоизлучения нетепловой, т. е. радиоизлучение образуется при движении быстрых электронов в магнитных полях. Часто в радиогалактиках наблюдается и мощное рентгеновское излучение. Так, в галактике М81 (она же Дева А) мощность излучения в радиодиапазоне составляет 10^{33} Вт, а в рентгеновском — 10^{35} Вт. Рентгеновское излучение также возникает при движении электронов в магнитных полях, но скорость их очень велика: она близка к скорости света.

В радиогалактиках часто наблюдаются выбросы вещества сложной структуры, масса которых может достигать $10^5\ M_{\odot}$. Природа этих выбросов, требующих энергии порядка 10^{46} Дж, что соответствует излучению Галактики за миллиард лет, и источники такой энергии пока неясны.

Во многих активных галактиках (как с радиоизлучением, так и без него) в ядрах наблюдается движение огромных масс газа (до $10^8\ M_{\odot}$) со скоростями от 500 до 4000 км/с. При этом ядра этих галактик имеют очень небольшие размеры, часто не превышающие 10 пк. Некоторые объекты к тому же оказываются переменными: их светимости могут изменяться в 400—1000 раз.

Для объяснения явления активности галактик была выдвинута гипотеза о существовании в них сверхмассивных черных дыр. Эта гипотеза нашла подтверждение в 1994 г., когда на космическом телескопе Хаббла удалось сфотографировать газовый диск в центре галактики М81, упомянутой выше как галактика Дева А, и определить скорость его вращения. Это дало возможность определить массу центрального тела, которое оказалось сверхмассивной черной дырой.

6. Квазары. В 1963 г. были обнаружены квазизвездные радиоисточники — квазары. Сначала их назвали радиозвездами, поскольку их оптические изображения не отличались от звезд. После измерения их красных смещений и определения расстояний стало ясно, что это самые мощные источники излучения, которые встречаются в природе. Расстояние до квазара 3С273 оказалось равным 3 млрд св. лет, до квазара 3С9 — 13 млрд св. лет. Вычисления светимости показали, что светимость квазара в видимом диапазоне больше светимости гигантской галактики примерно в 100 раз, а в радиодиапазоне превышает 10^{42} Вт, что в 100 000 раз превышает мощность радиоизлучения Галактики.

Еще большее удивление вызвала открытая несколько позже переменность квазара. Оказалось, что некоторые квазары меняют свою светимость в 20 раз всего за 6—7 дней. Но это значит, что столь огромная энергия выделяется областью, размеры которой меньше 1000 — 10 000 а. е. Хотя и ясно, что механизм выделения энергии у квазара и активной галактики в принципе один и тот же — падение газа на сверхмассивную черную дыру, тем не менее вопрос о природе квазара еще далек от окончательного решения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Что такое Галактика! Опишите строение Галактики.
2. Что такое звездное скопление! Перечислите его типы.
3. Что такое туманность, ГМО!
4. Каковы причины свечения туманностей!
5. Что такое «гравитационная неустойчивость»,
6. Опишите основные типы галактик.
7. Что такое красное смещение!
8. Что такое активные галактики!
9. Что такое квазар!
10. Что такое скопление галактик!

Глава VII

РАЗВИВАЮЩИЙСЯ МИР

§ 31. БОЛЬШАЯ ВСЕЛЕННАЯ

1. Ньютоновская модель мира. Появление системы Коперника, поместившего в центре мира (Вселенной) не Землю, а Солнце, и открытие Галилеем спутников Юпитера сделало ненужным само понятие центра мира и привело к построению первой научной системы мира, основанной на теории Ньютона и получившей название ньютоновской или классической.

По Ньютону, мир — это бесконечное пространство, в котором выполняются все постулаты геометрии Евклида. Пространство неограниченно простирается во все стороны, время всегда и везде равномерно течет с одинаковой скоростью. Мир бесконечен во времени и пространстве и однороден, т. е. если взять достаточно большой объем, то свойства материи, главным из которых является средняя плотность материи, в этом объеме ничем не отличаются от свойств материи, заключенной в любом другом таком же объеме. Все тела во Вселенной связаны силами взаимного тяготения.

Понятие однородности мира требует объяснения. Оно совершенно аналогично понятию однородности газа или жидкости. Действительно, о достаточно большом объеме газа мы можем говорить, что в любой части этого объема содержится одно и то же количество молекул или атомов, т. е. газ можно считать однородным. Для воздуха в комнате таким объемом может служить, скажем, объем 1 см^3. Но если мы будем исследовать воздух объемом 10^{-18} см^3, то в двух соседних объемах воздуха количество атомов уже может отличаться весьма существенно. Кроме того, если мы возьмем объем воздуха в несколько сот кубических километров, то в таком объеме газ нельзя считать однородным, так как в разных частях этого объема плотность газа окажется различной. Если мы перейдем к пространству во Вселенной, то в масштабах галактики нельзя говорить об однородности, поскольку в соседних объемах средняя плотность материи окажется разной. Но если брать объемы в масштабах сотен мегапарсек, то такие и большие объемы уже неотличимы по средней плотности вещества в них. В то же время эти объемы малы по сравнению с объемом наблюдаемой части Вселенной. В этом смысле Вселенная однородна.

В теории Ньютона невозможно вычислить силу тяготения, так как она является суммой всех сил, действующих со стороны всех тел Вселенной; кроме того, невозможно объяснить, почему ночное небо темное. Ведь луч зрения, продолжаясь в бесконечном пространстве, равномерно заполненном звездами, рано или поздно, но обязательно попадет в какую-нибудь звезду, т. е. небо должно быть полностью закрыто звездами и сиять так, как сияет поверхность Солнца. В то же время в ограниченном объеме закон Всемирного тяготения строго выполняется. Два эти противоречия называются гравитационным и фотометрическим парадоксами.

2. Общая теория относительности. В начале XX в. А. Эйнштейн построил новую теорию пространства — времени-тяготения, названную общей теорией относительности (ОТО). Это очень сложная и глубокая теория, описывающая свойства пространства и времени в связи с распределением и движением материи. Она позволила совершенно по-новому взглянуть на проблему строения и эволюции Вселенной в целом.

Вообще вопрос о применении той или иной теории к Вселенной в целом — один из сложнейших вопросов философии естествознания. Ведь теория строится на материале исследований и экспериментов в ограниченной области пространства и на ограниченном промежутке времени, а применяется ко всей Вселенной. Поэтому в каждый данный момент мы должны считать, что наши представления о Вселенной верны. Но при этом необходимо понимать, что в дальнейшем наступит момент, когда новые экспериментальные данные приведут к заключению, что наша теория неверна. Так будет создана новая теория, которая сможет объяснить новые и старые экспериментальные данные и определит границы, в которых верна и применима старая теория.

В ОТО нет гравитационного парадокса, как такового, так как в ней непосредственно вычисляются ускорения тел относительно друг друга, а суммарное действие удаленных тел равно нулю. Легко разрешается и фотометрический парадокс, о чем будет сказано ниже.

Несмотря на то что ОТО очень сложна математически, основные ее идеи можно понять, не прибегая к высшей математике. В ее основе лежат два постулата, основанные на точных экспериментах:

1. Скорость света есть предельная скорость распределения сигнала и одинакова во всех системах отсчета (опыт Майкельсона—Морлея, лежащий в основе специальной теории относительности).

2. Все тела в гравитационном поле движутся с одинаковым ускорением независимо от массы.

Уже в специальной теории относительности (СТО) Эйнштейн показал, что мир имеет четыре измерения — три пространственных и одно временное. Но СТО применимо только к инерциальным системам отсчета. В неинерциальной системе отсчета (в ньютоновской физике) появляются силы инерции (например, центробежная сила), которые тоже вызывают ускорения всех тел, не зависящие от массы. Эйнштейн предположил, что силы тяготения имеют ту же природу, что и силы инерции. В действительности в четырехмерном мире тела движутся тоже по инерции. Но наличие тяжелой массы (чаще говорят: гравитационной массы) приводит к тому, что свойства четырехмерного пространства в ее окрестности изменяются, оно становится искривленным. Это означает, что правила измерений расстояний в таком пространстве отличаются от теоремы Пифагора. Пространство с такими новыми правилами называется искривленным.

Мы ощущаем только трехмерное пространство. Поэтому движение тел, наблюдаемое нами, — это проекция четырехмерного пространства на трехмерное пространство и на ось времени. Естественно, что при таких проекциях возможны искажения. Очень грубая аналогия — географическая карта. На любой карте есть искажения, и очень значительные, если карта изображает весь земной шар или значительную его часть. Так, на картах в проекции Меркатора меридианы и параллели изображаются прямыми линиями. В этой проекции нет постоянного масштаба. Поэтому если мы проведем на глобусе большой круг (аналог прямой на плоскости) и будем двигаться по нему равномерно, то на карте Меркатора наша траектория представится кривой линией и движение по ней будет ускоренным.

Ряд выводов ОТО непосредственно касается астрономиче-

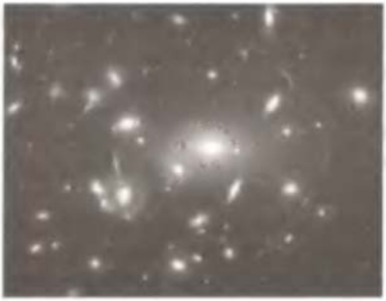


Рис. 81. Гравитационные линзы.

ских проблем. Так, ОТО необходимо для расчетов движения малых планет и космических аппаратов, при полетах к астероидам и далеким планетам. Примером необходимости таких расчетов служат проекты «ВеГа» (полет к Венере, оттуда навстречу комете Галлея) и проекты «Пионер» и «Вояджер». ОТО предсказала черные дыры (о них подробнее ниже), гравитационные волны (прямых измерений нет, но косвенные подтверждения есть) и искривление лучей света в поле тяготения (так называемая гравитационная линза). На рисунке 81 показана одна из таких линз, снятых космическим телескопом Хаббла. Все объекты на этом снимке — галактики, их форма искажена отклонением лучей света в поле тяготения невидимой нами галактики, расположенной значительно ближе к нам. Можно уверенно сказать, что все предсказанные ОТО эффекты обнаружены и полностью подтверждают выводы теории.

3. Модель Фридмана. В 20-х гг. нашего столетия выдающийся советский физик А. А. Фридман установил, что из уравнений ОТО следует, что Вселенная не может быть неизменной, она должна эволюционировать. Наш мир должен сжиматься или расширяться. С точки зрения наблюдателя (независимо от того, в какой точке он находится: ведь мир однороден и в каждой точке все происходит так же, как и во всех остальных), все далекие объекты удаляются от него (или приближаются к нему) с тем большей скоростью, чем дальше они расположены. При этом изменяется средняя плотность вещества во Вселенной. В наблюдениях расширение Вселенной проявляется в том, что в спектрах далеких галактик линии поглощения смещаются в красную сторону спектра. Это и есть уже описанное нами красное смещение (см. § 30, п. 2).

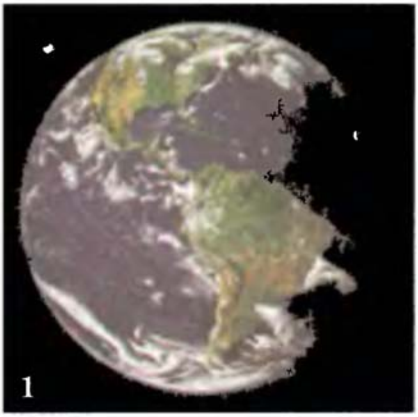
Красное смещение легко снимает фотометрический парадокс. Ведь при переходе ко все более и более удаленным объектам яркость звезды уменьшается еще и потому, что из-за красного смещения уменьшается энергия кванта. Когда скорость удаления приближается к скорости света, звезда становится невидимой.

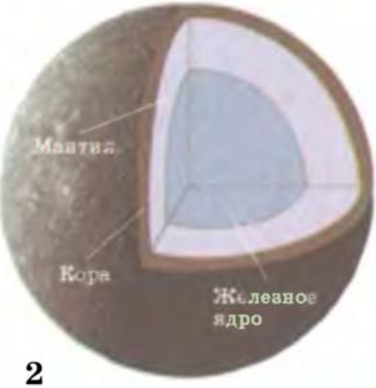
В теории Фридмана появляется величина, называемая критической плотностью; она может быть выражена через постоянную Хаббла:

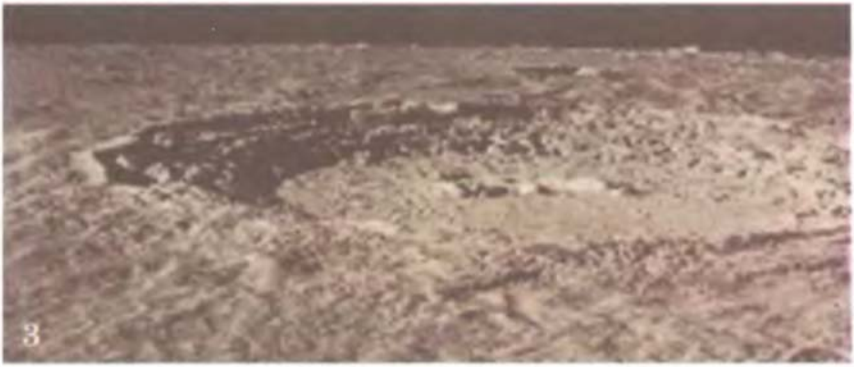
$$\rho_{\text{К}} = \frac{3H^2}{8\pi G},$$

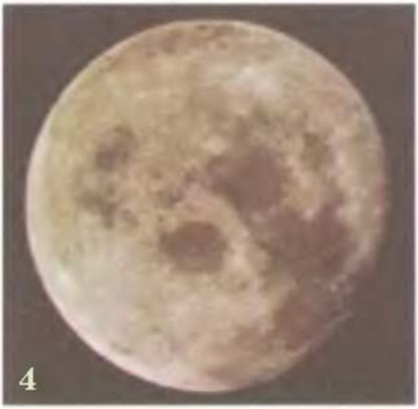
ЗЕМЛЯ И ЛУНА

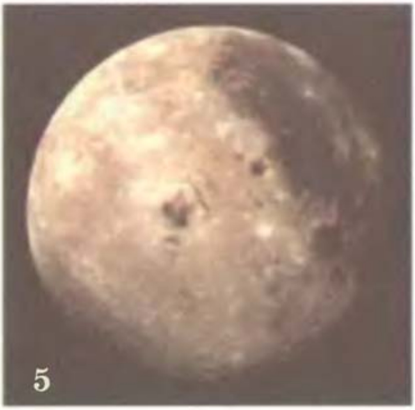
вклейка I


1


Мантия
Кора
Железное ядро
2

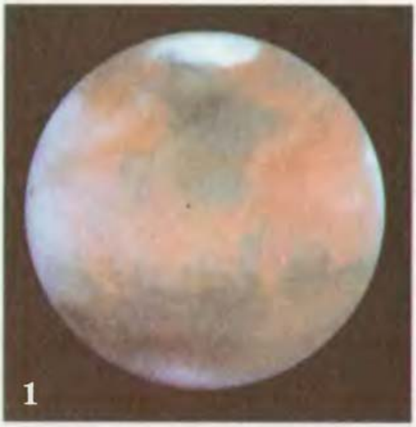

3

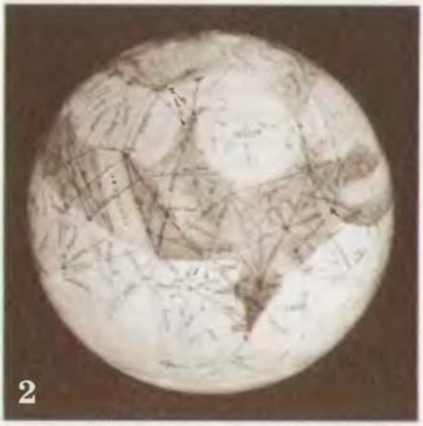

4

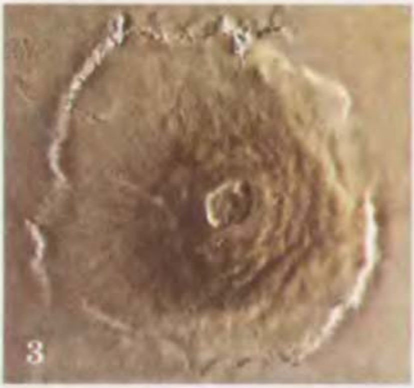

5

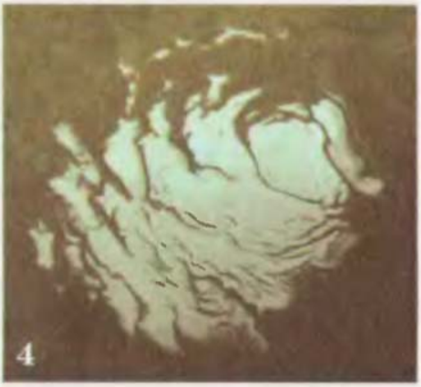
1. **Земля (вид из космоса).**
2. **Внутреннее строение планет группы Земли.**
3. **Луна. Кратер Коперник.**
4. **Видимая сторона Луны.**
5. **Обратная сторона Луны.**

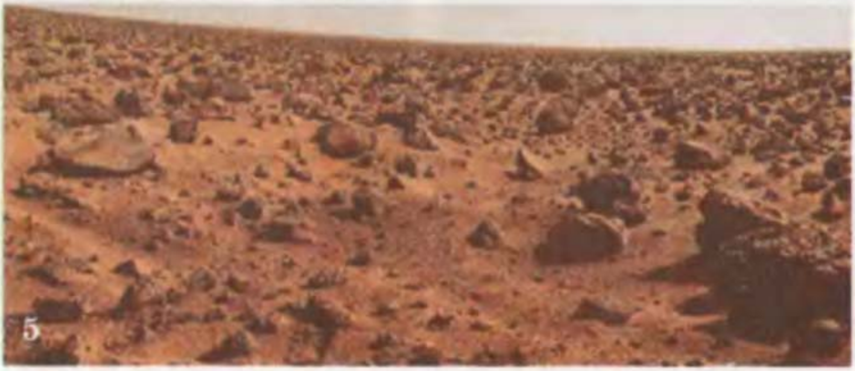
МАРС


1


2

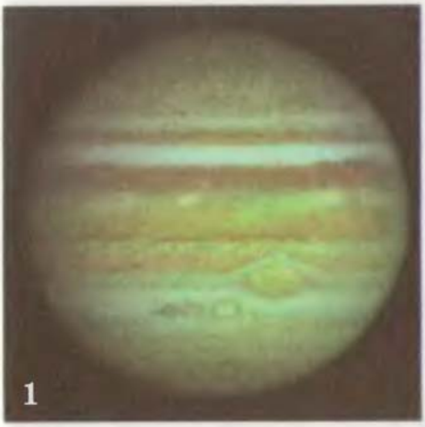

3

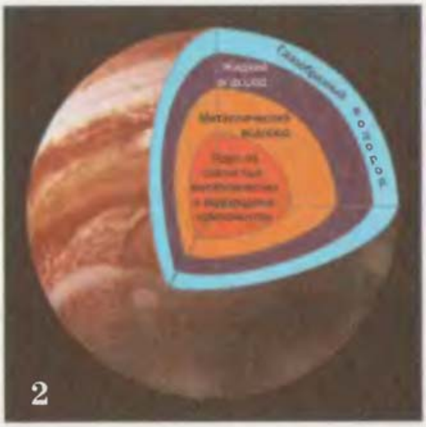

4


5

1. **Марс (общий вид).**
2. **Так рисовали карту Марса по наблюдениям с Земли сторонники каналов.**
3. **Высочайшая гора в Солнечной системе – вулкан Олимп на Марсе.**
4. **Южная полярная шапка Марса летом.**
5. **Пейзаж Марса по снимкам АМС «Викинг».**

ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ

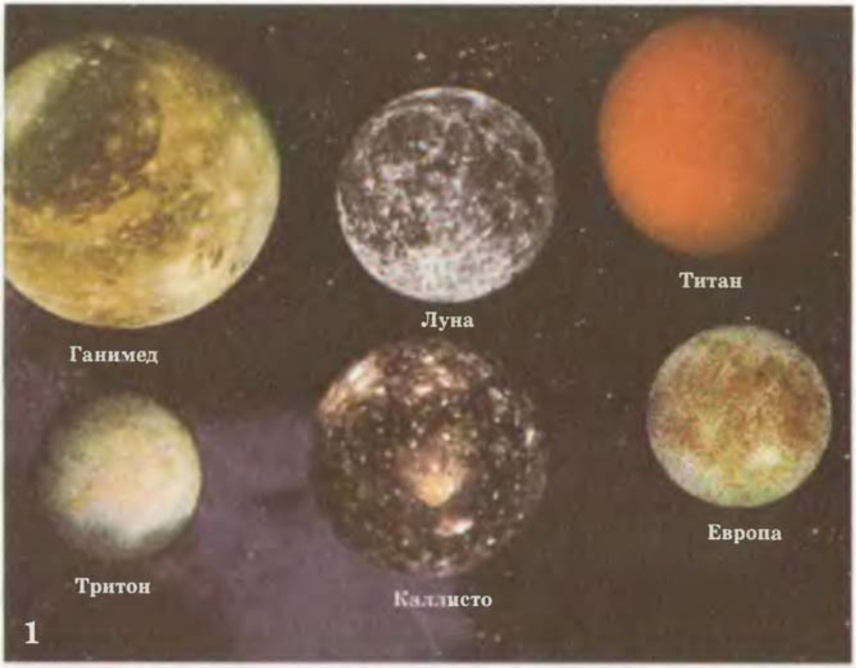


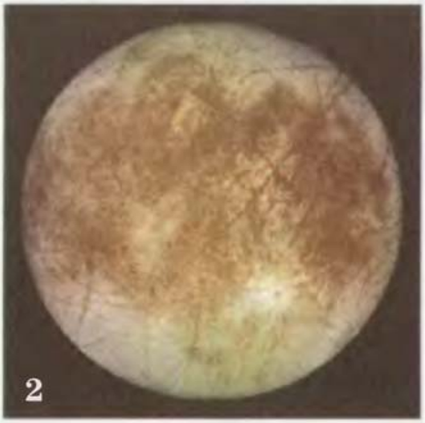

2
Газообразный водород
Жидкий водород
Металлический водород

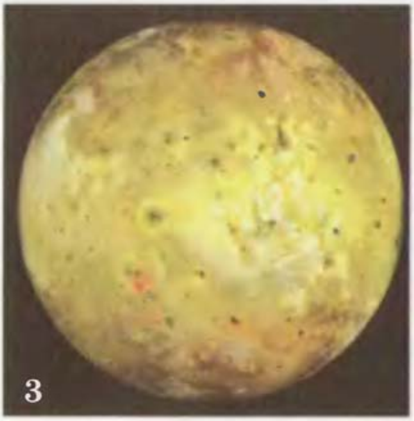
1. Юпитер.
2. Строение Юпитера.
3. Кольца Сатурна.
4. Кольцо Юпитера.
5. Сатурн.

СПУТНИКИ

вклейка IV


Ганимед
Луна
Титан
Европа
Тритон
Каллисто
1



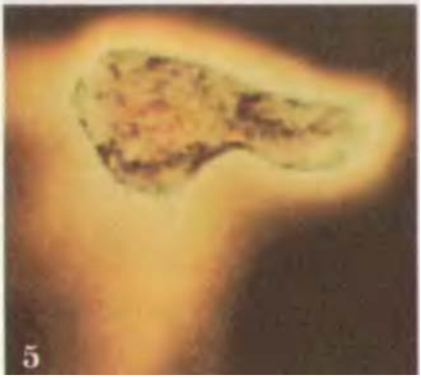


1. **Самые большие спутники Солнечной системы.**
2. **Спутник Юпитера Европа.**
3. **Спутник Юпитера Ио.**
4. **Вулкан на Ио.**

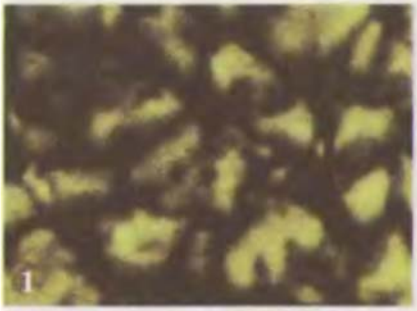
АСТЕРОИДЫ, КОМЕТЫ, МЕТЕОРИТЫ

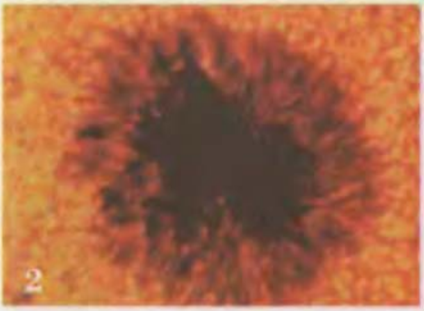
вклейка V

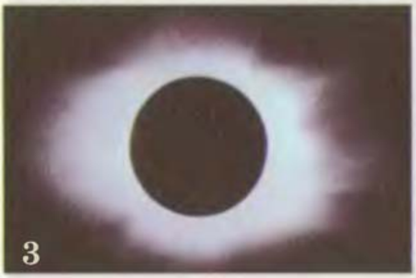
1. Комета Хэйла — Боппа.
2. Астероид Эрос.
3. Астероид Ида.
4. Комета Хиякутаки.
5. Ядро кометы Галлея.

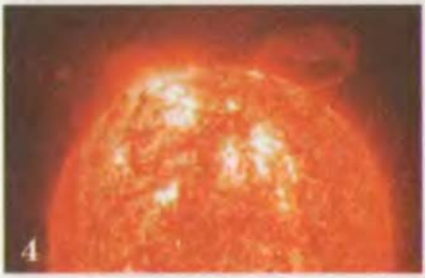


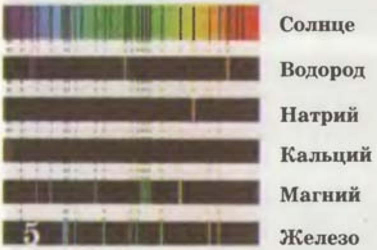
СОЛНЦЕ

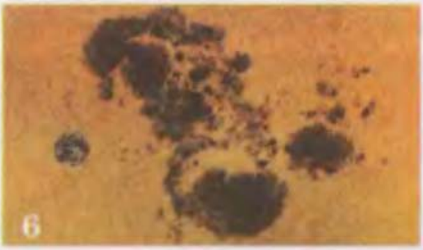


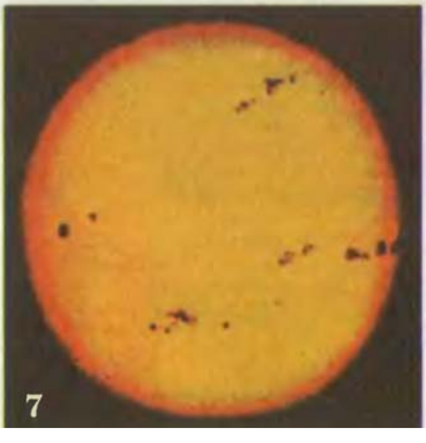






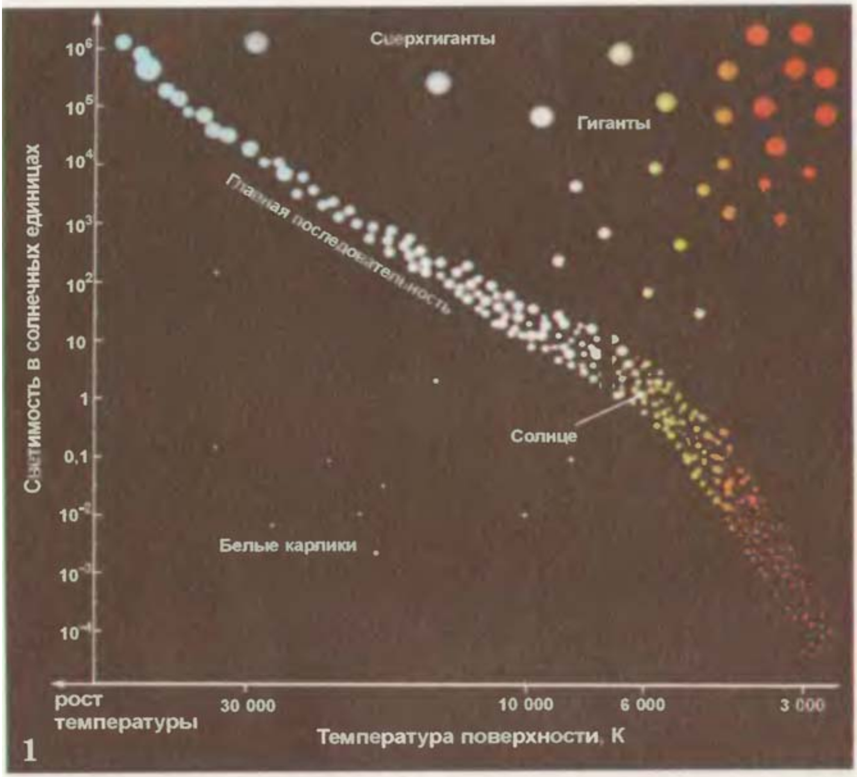

Солнце
Водород
Натрий
Кальций
Магний
Железо
5



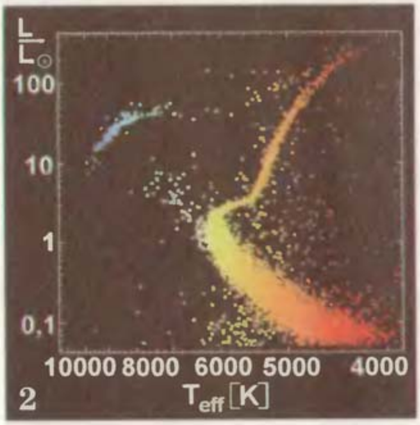


1. Грануляция.
2. Пятно на Солнце.
3. Корона в минимуме солнечной активности.
4. Протуберанец и факелы (снимок в спектральной линии водорода).
5. Спектры Солнца и паров некоторых элементов. Линии в спектрах совпадают.
6. Группа солнечных пятен (для масштаба помещено изображение Земли).
7. Солнце. Общий вид на экране телескопа.

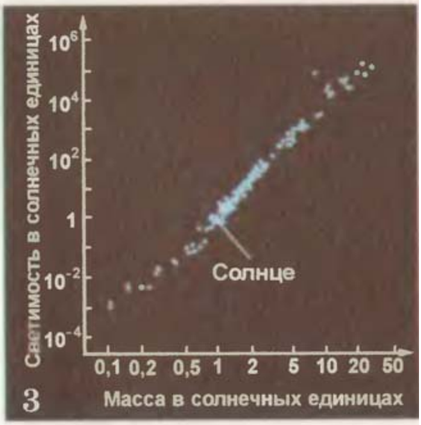
ЗВЕЗДЫ



1



2

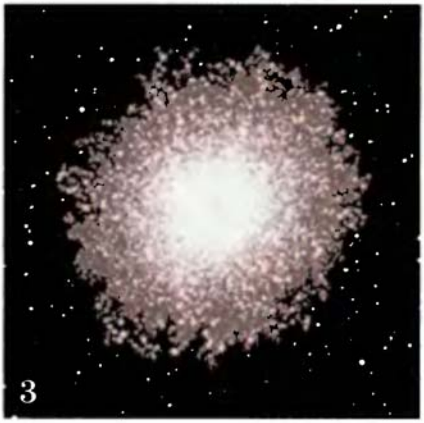


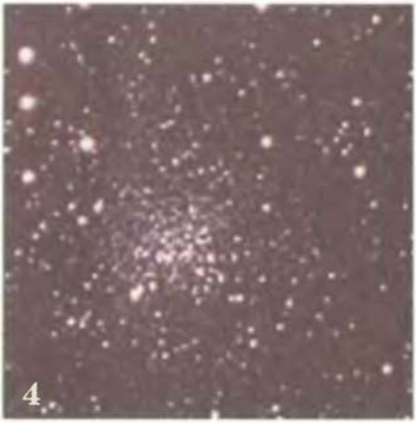
3

1. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела.
2. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела для старого скопления.
3. Диаграмма соотношения масса — светимость.

ГАЛАКТИКА (Млечный Путь)

вклейка VIII





1. Участок Млечного Пути.
2. Участок Млечного Пути в направлении центра Галактики.
3. Шаровое звездное скопление.
4. Рассеянное звездное скопление.

где H — постоянная Хаббла; G — гравитационная постоянная.

В больших масштабах (десятки и сотни мегапарсек) свойства пространства и времени зависят от средней плотности вещества во Вселенной ($\bar{\rho}$). Если эта плотность меньше критического значения ($\bar{\rho}_{\text{к}}$), то мир бесконечен во времени и пространстве. Его геометрические свойства описываются геометрией Лобачевского, в которой предполагается, что через точку можно провести любое количество прямых, параллельных данной. При $\bar{\rho}=\rho_{\text{к}}$ мир описывается привычной нам геометрией Евклида (через точку можно провести только одну прямую, параллельную данной). В этих случаях мир бесконечен. При $\bar{\rho}>\rho_{\text{к}}$ мир имеет конечный объем и в нем содержится конечная масса вещества. При этом мир не имеет границ. Представить себе такой мир невозможно, ибо мы ощущаем только трехмерный мир. В ОТО мир четырехмерный: три пространственных измерения и время. Ближайшим, привычным нам аналогом замкнутого, конечного мира является поверхность шара. Она тоже конечна и не имеет границ. Более подробное рассмотрение этого вопроса выходит за рамки школьной программы.

Дальнейшая «судьба» Вселенной зависит от ее средней плотности ($\bar{\rho}$). Если $\bar{\rho}>\rho_{\text{к}}$, то скорость расширения будет замедляться, в конце концов расширение сменится сжатием и Вселенная вернется к исходному состоянию. Если $\bar{\rho}\leqslant\rho_{\text{к}}$, то расширение будет происходить неограниченно долго.

Какова в действительности средняя плотность во Вселенной в настоящее время, не совсем ясно. По современным оценкам значение средней плотности лежит между $5\cdot10^{-27}$ и $3\cdot10^{-28}$ кг/см^3. Но эти оценки основаны на наблюдаемых формах материи и в несколько раз меньше критической. По общему мнению, средняя плотность практически совпадает с критической. Недостающая масса и есть скрытая масса, но что она собой представляет, пока неясно.

ОТО позволяет интерпретировать постоянную Хаббла как величину, обратную промежутку времени, прошедшего с момента возникновения Вселенной:

$$H=\frac{1}{T}.$$

Действительно, если идти по шкале времени назад, то получается, что примерно 15—20 млрд лет Вселенная имела нулевые размеры и бесконечную плотность. Такое состояние принято называть сингулярностью. Она появляется во всех вариантах фридмановской модели. Ясно, что здесь лежит предел применимости теории и нужно выходить за рамки этой модели. При достаточно малых временах квантовые эффекты (ОТО чисто классическая теория) становятся определяющими.

§ 32. ОТ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА ДО ОБРАЗОВАНИЯ ГАЛАКТИК

1. Возникновение Вселенной. В последние годы успехи теории элементарных частиц позволили разработать «сценарий» событий, происходивших в первые мгновения существования Вселенной. Термин «сценарий» появился сравнительно недавно. Он означает, что проводится качественный анализ возможных следствий принятых исходных положений и сравнение их с наблюдениями. Такая процедура очень важна, поскольку позволяет на самом раннем этапе разработки сложнейших теорий заранее опровергнуть неверные варианты.

Согласно современным взглядам Вселенная спонтанно (без причины) возникает в виде кванта пространства-времени. Этот процесс описывается квантовой механикой, согласно которой возникновение Вселенной имеет много возможных направлений. Вселенная может иметь много измерений, элементарные частицы, в том числе протоны и электроны, могут получить разные массы. Обязательно ли во Вселенной остаются четыре измерения и те соотношения между массами и зарядами элементарных частиц, которые существуют в нашей Вселенной, мы не знаем. Но с точки зрения квантовой механики, возможно, существует много Вселенных, в которых реализуются все возможности. Но мы никогда ничего о них не узнаем. Даже само их существование навсегда останется только гипотезой, ибо между разными Вселенными в принципе не может быть никаких связей. Наша же Вселенная такова, потому что в другой Вселенной мы просто не могли бы появиться.

История Вселенной начинается с 10^{-43} с после момента «ноль», который мы называем моментом рождения Вселенной. До этого момента не существует ни времени, ни пространства; поэтому нельзя спрашивать о том, где и когда существуют другие Вселенные. У них свое пространство и свое время, для нас этот вопрос просто не имеет смысла. Дело в том, что в физическом вакууме существуют только «виртуальные» (т. е. «возможные») частицы. В нем непрерывно происходит самопроизвольное рождение пар частица—античастица. Этот процесс становится возможным потому, что существует принцип неопределенности, который заключается в том, что произведение $\Delta E \Delta t \geqslant \hbar$, где $\hbar$ — постоянная Планка, деленная на 2π.

Если промежуток времени достаточно мал, то неопределенность энергии может стать настолько большой, что появятся частица и античастица, которые просуществуют время Δt. В отличие от «реальных» частиц «виртуальные» не могут служить основой системы отсчета. Поэтому в вакууме невозможно установить соотношения раньше—позже или право—лево. Но в остальном «виртуальные» частицы ничем не отличаются от «реальных». Они имеют массу и заряд, который проявляется в эксперименте; в частности, они образуют плотность вакуума. В нашей Вселенной в настоящее время плотность вакуума, как это следует из спектроскопических экспериментов, имеет порядок 10^{-30} кг/м^3.

В момент возникновения радиус Вселенной составляет 10^{-35} м, плотность 10^{101} кг/м^3 и температура 10^{30} К. Естественно, что при таких условиях ничего похожего на наш мир не было. В частности, элементарные частицы в это время не имели массы. Плотность определялась энергией взаимодействия между ними ($E=mc^2$). Материя в момент возникновения Вселенной была в состоянии физического вакуума. В отличие от обычной материи (состоящей из элементарных частиц) в физическом вакууме имеются гравитационные силы отталкивания.

Сразу же после возникновения Вселенная под действием этих сил начинает расширяться. Причем это расширение происходит с огромной скоростью: уже к моменту $t=10^{-35}$ с после начала размеры Вселенной увеличиваются примерно в $10^{3\cdot10^8}$ раз (это невероятное число означает единицу с тремястами миллионами нулей). Такая скорость расширения не противоречит принципу максимальной скорости света, поскольку эта скорость относится к расширению пространства, а не к движению в пространстве «реальных» частиц.

Плотность материи во Вселенной не изменяется (работа сил, вызывающих расширение, увеличивает энергию вещества, а энергия и масса связаны соотношением Эйнштейна), температура падает и тогда, когда достигает некоторого предела; вакуум распадается, в нем возникают элементарные частицы и античастицы. Это начало формирования той Вселенной, в которой мы живем.

2. Эволюция стандартной Вселенной. В период времени от 10^{-35} до 10^{-8} с важных событий не происходит, а к моменту времени 10^{-8} с появляются протоны и антипротоны. Плотность вещества к этому моменту падает до 10 кг/м^3, а температура — до 10 К. К моменту времени 10 с температура падает до 10^{10} К, и в процессе столкновений уже не могут возникать частицы и античастицы. В дальнейшем в реакциях аннигиляции исчезают все античастицы. При этом оказывается, что частиц было несколько больше. На 1 000 000 000 античастиц (антипротонов и позитронов) приходилось 1 000 000 001 частица (протонов и электронов). В результате сейчас наш мир состоит из протонов и электронов, а не из антипротонов и позитронов. Причина таится в особенностях процессов, происходивших в период времени до 10^{-35} с.

Примерно в течение времени от 1 до 300 с происходят ядерные реакции слияния протонов и нейтронов, в результате чего образуются дейтерий, гелий и литий. Количество образовавшихся дейтерия и гелия зависит от плотности вещества в момент их образования, а значит, и от средней плотности вещества в настоящий момент. Расчет показывает, что доля гелия по весу должна составлять от 25 до 30%. Это хорошо согласуется с современными значениями. Более тяжелые элементы образовались в звездах (эти процессы мы рассмотрим в § 33).

3. Возникновение реликтового излучения. В следующий миллион лет продолжается расширение Вселенной, сопровождающееся постепенным уменьшением температуры. Первое время температура достаточно высока, чтобы газ оставался ионизованным. Но ионизованный газ (плазма) сильно взаимодействует с излучением, и их температуры остаются равными. Но как только температура во Вселенной падает до 4000 К, а это происходит примерно через миллион лет после начала расширения, начинается рекомбинация атомов и излучение «отрывается» от вещества. С этого момента излучение и вещество ведут себя по-разному.

Излучение, возникшее в тот момент, когда температура понизилась до 4000 К, приходит к нам в настоящее время из областей, удаленных на многие миллиарды световых лет. По закону Хаббла эти области удаляются от нас со скоростями, близкими к скорости света. Эффект Доплера в этом случае колоссален. Формула для изменения длин волн, приведенная в § 25, в данном случае неприменима — следует использовать более сложную формулу теории относительности: $\frac{\lambda-\lambda_0}{\lambda_0}=\frac{\Delta\lambda}{\lambda}=z=\sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$, где z для реликтового излучения примерно равно 1000, т. е. пришедшее к нам излучение должно иметь максимум в длине волны около 1 мм, поскольку по закону Вина $T=4000$ К. Максимум излучения приходится на длину волны, равную 725 нм. Это излучение было открыто в 1965 г. Как и ожидалось, оно приходит к нам со всех направлений с одинаковой интенсивностью, т. е. вещество в момент отрыва излучения было действительно в высокой степени однородно.

Таким образом, теория образования Вселенной подтверждается двумя проверяемыми следствиями: реликтовым излучением и современным химическим составом. Очень важно, что тем самым подтверждается и теория элементарных частиц, которая в настоящее время другим проверкам не поддается.

4. Возникновение галактик. Рекомбинация водорода и гелия приводит к тому, что излучение и вещество практически перестают взаимодействовать, давление света исчезает и равновесие вещества определяется в дальнейшем только газовым давлением. Поскольку это давление невелико, оно уже неспособно противодействовать гравитации (см. § 29). Вещество фрагментирует на объекты массой примерно $10^{15}\ M_\odot$, что соответствует массе скопления галактик.

Дальнейший путь формирования галактик заключается в последовательной фрагментации этих объектов на облака, каждое из которых превращается в галактику. То, что затем произойдет распад каждого облака на звезды, очевидно, но сам процесс не вполне ясен. Сравнительно недавно с помощью космического телескопа Хаббла были получены фотографии «глубокого космоса» — областей, удаленных от нас на 10--12 млрд св. лет. Мы видим эти области такими, какими они были в период формирования галактик. Поражает обилие небольших объектов. В то время расстояния между галактиками были примерно в 2 раза меньше, чем сейчас. Но наблюдаемые объекты намного меньше, чем теперешние галактики. Пока остается непонятным, что мы видим: области бурного образования звезд в одной галактике или небольшие вновь образовавшиеся галактики, которые затем сольются в отдельные гигантские звездные системы.

§ 33. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

1. Формирование звезд. Прежде чем переходить к рассмотрению эволюции галактик, рассмотрим подробнее пути эволюции звезд.

В газовой туманности после появления в ней молекул и пылинок происходит резкое падение температуры. Это связано с тем, что и молекулы, и пыль излучают при низкой температуре в инфракрасном диапазоне. В этом диапазоне туманность практически прозрачна и излучение уносит энергию из туманности. Падение температуры приводит к падению давления, и туманность начинает сжиматься. При этом вся выделяющаяся гравитационная энергия уносится излучением и температура не поднимается. По мере увеличения плотности туманность распадается на отдельные сгустки, которые дадут в дальнейшем начало новому поколению звезд. Так начинается процесс звездообразования в газопылевой туманности.

Сжатие фрагмента, который даст начало звезде, с самого начала проходит неравномерно: в центре быстрее, чем на периферии. В результате плотность в центре быстро увеличивается и достигает таких значений, когда вещество перестает быть прозрачным для инфракрасного излучения. Температура в образующемся ядре поднимается, возрастает давление, и сжатие в нем останавливается.

Но внешние слои продолжают падать вниз и сталкиваются с поверхностью ядра. Температура его возрастает, оно начинает излучать, и в ближайших к ядру слоях пыль испаряется. Образуется объект, в центре которого расположена уже сформировавшаяся звезда, а на периферии — почти сферическая оболочка, содержащая пыль и газ и почти непрозрачная для излучения.

Постепенно оболочка прогревается и становится прозрачной для видимого излучения. Это знаменует появление новой звезды. Возможно, что оболочка становится прозрачной потому, что магнитное поле ее «раскручивает» (при этом сама звезда замедляет свое вращение). Во вращающейся оболочке материя концентрируется в экваториальной плоскости и образует газопылевой диск, который даст в дальнейшем начало планетной системе (см. § 35). Такие газопылевые образования (это либо указанные диски, либо остатки газопылевых оболочек) обнаружены у явно молодых звезд по инфракрасному излучению.

2. Начальная стадия эволюции звезд. На диаграмме Г—Р появившаяся звезда занимает точку в правом верхнем углу: у нее большая светимость и низкая температура. Основное излучение происходит в инфракрасном диапазоне. До нас доходит излучение холодной пылевой оболочки. В процессе эволюции положение звезды на диаграмме будет меняться. Единственным источником энергии на этом этапе служит гравитационное сжатие. Поэтому звезда достаточно быстро перемещается параллельно оси ординат.

Температура поверхности не меняется, а радиус и светимость уменьшаются. Температура в центре звезды повышается, достигая величины, при которой начинаются реакции с легкими элементами: литием, бериллием, бором, которые быстро выгорают, но успевают замедлить сжатие. Трек поворачивается параллельно оси ординат, температура на поверхности звезды повышается, светимость остается практически постоянной. Наконец, в центре звезды начинаются реакции образования гелия из водорода (горение водорода). Звезда выходит на главную последовательность. Продолжительность начальной стадии определяется массой звезды. Для звезд типа Солнца она около 1 млн лет, для звезды массой 10 $M_\odot$ примерно в 1000 раз меньше, а для звезды массой 0,1 $M_\odot$ в тысячи раз больше.

3. Эволюция звезды малой массы. На стадии главной последовательности звезда светит за счет выделения энергии в ядерных реакциях превращения водорода в гелий. Запас водорода обеспечивает светимость звезды массой 1 $M_\odot$ примерно в течение 10^{10} лет. Звезды большей массы расходуют водород быстрее: так, звезда массой в 10 $M_\odot$ израсходует водород менее чем за 10^7 лет (светимость пропорциональна четвертой степени массы).

В начале эволюции звезда малой массы имеет лучистое ядро и конвективную оболочку (рис. 82, I). По мере выгорания водорода центральные области звезды сильно сжимаются. К моменту полного выгорания водорода в центре звезды образуется небольшое гелиевое ядро. В ядре плотность вещества и температура достигают значений 10^9 кг/м и 10^8 К соответ-

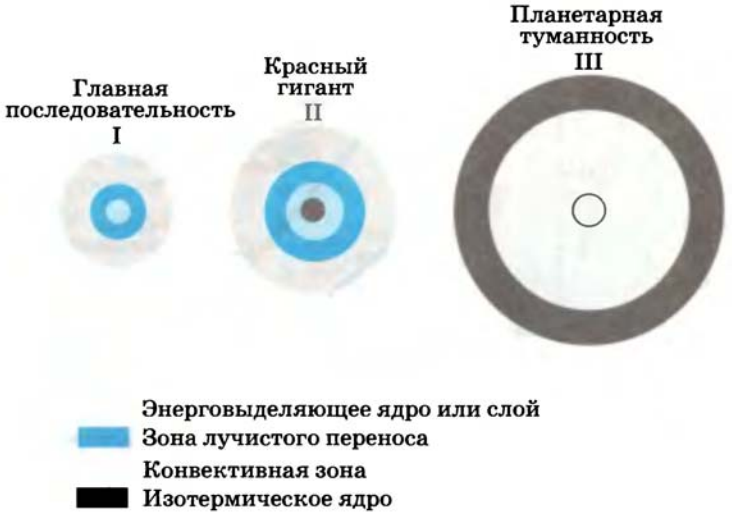

Главная последовательность
I
Красный гигант
II
Планетарная туманность
III
Энерговыделяющее ядро или слой
Зона лучистого переноса
Конвективная зона
Изотермическое ядро

Рис. 82. Эволюция звезды малой массы.

ственно. Горение водорода происходит на поверхности ядра. Поскольку температура в ядре повышается, темп выгорания водорода увеличивается, увеличивается светимость. Лучистая зона постепенно исчезает. А из-за увеличения скорости конвективных потоков внешние слои звезды раздуваются. Размеры и светимость ее возрастают — звезда превращается в красный гигант (рис. 82, II). Наконец, скорость конвективного потока на каком-то уровне достигает второй космической скорости, оболочка отрывается, и звезда превращается в белый карлик, окруженный планетарной туманностью.

Эволюционный трек звезды малой массы на диаграмме Г—Р показан на рисунке 83.

4. Эволюция звезды большой массы. После выхода на главную последовательность эволюция звезды большой массы ($>1{,}5\ M_{\odot}$) определяется условиями горения ядерного горючего в недрах звезды. На стадии главной последовательности это — горение водорода, но в отличие от звезд малой массы в ядре доминируют реакции углеродно-азотного цикла. В этом цикле атомы C и N играют роль катализаторов. Скорость выделения энергии в реакциях такого цикла пропорциональна T^{17}. Поэтому в ядре образуется конвективное ядро, окруженное зоной, в которой перенос энергии осуществляется излучением.

Светимость звезд большой массы намного превышает светимость Солнца, и водород расходуется значительно быстрее. Связано это и с тем, что температура в центре таких звезд тоже намного выше.

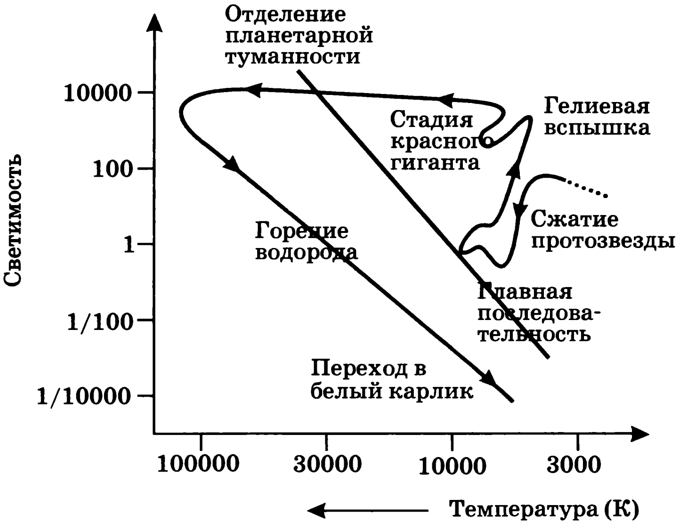

Отделение
планетарной
туманности
Стадия
красного
гиганта
Гелиевая
вспышка
Сжатие
протозвезды
Горение
водорода
Главная
последовательность
Переход в
белый карлик
Светимость
10000
100
1
1/100
1/10000
100000
30000
10000
3000
Температура (К)

Рис. 83. Эволюционный трек звезды малой массы.

По мере уменьшения доли водорода в веществе конвективного ядра темп выделения энергии уменьшается. Но поскольку темп выделения определяется светимостью, ядро начинает сжиматься, и темп выделения энергии остается постоянным. Звезда же при этом расширяется и переходит в область красных гигантов.

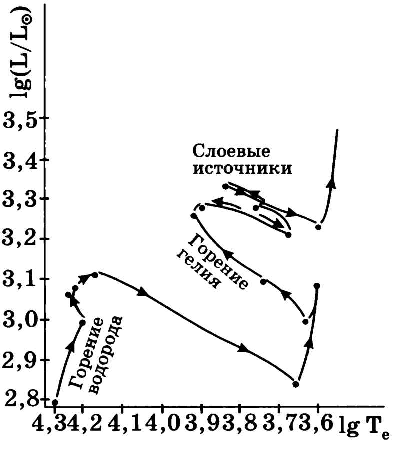


Рис. 84. Эволюционный трек звезды большой массы.

Когда же водород полностью исчерпывается, в ядре начинает идти тройная гелиевая реакция и одновременно реакция образования кислорода (3He⇒C и C+He⇒O). В то же время на поверхности гелиевого ядра начинает гореть водород. Появляется первый слоевой источник.

Запас гелия исчерпывается очень быстро, так как в описанных реакциях в каждом элементарном акте выделяется сравнительно немного энергии. Картина повторяется, и в звезде появляются уже два слоевых источника, а в ядре начинается реакция C+C⇒Mg.

Эволюционный трек при этом оказывается очень сложным (рис. 84). На диаграмме Герцшпрунга—Ресселла звезда перемещается вдоль последовательности гигантов или (при очень большой массе в области сверхгигантов) периодически становится цефеидой. Но для нас важно, что в конце эволюции звезда большой массы имеет очень сложное строение. В каждом слое свой химический состав, в нескольких слоевых источниках протекают ядерные реакции, а в центре образуется железное ядро (рис. 85).

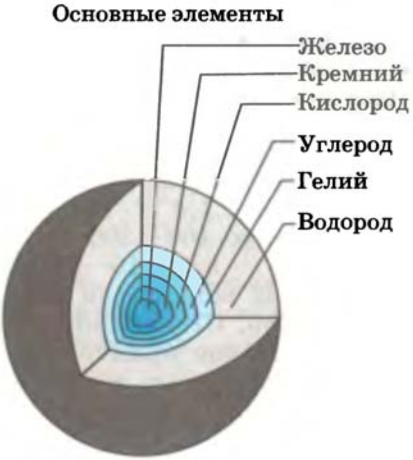


Рис. 85. Модель предсверхновой звезды.

Ядерные реакции с железом не протекают, так как они требуют затраты (а не выделения) энергии. Поэтому железное ядро быстро сжимается, температура и плотность в нем увеличиваются, достигая фантастических величин — температуры 10^9 К и давления 10^9 кг/м^3. В этот момент начинаются два важнейших процесса, идущие в ядре одновременно и очень быстро (по-видимому, за минуты). Первый заключается в том, что при столкновениях ядер атомы железа распадаются на 14 атомов гелия, второй — в том, что электроны «вдавливаются» в протоны, образуя нейтроны. Оба процесса связаны с поглощением энергии, и температура в ядре (также и давление) мгновенно падает. Внешние слои звезды начинают падение к центру.

Падение внешних слоев приводит к резкому повышению температуры в них. Начинают гореть водород, гелий, углерод. Это сопровождается мощным потоком нейтронов, который идет из центрального ядра. В результате происходит мощнейший ядерный взрыв, сбрасывающий внешние слои звезды, уже содержащие все тяжелые элементы, вплоть до калифорния. По современным воззрениям все атомы тяжелых химических элементов (т. е. более тяжелых, чем гелий) образовались во Вселенной именно во вспышках сверхновых. На месте взорвавшейся сверхновой остается в зависимости от массы взорвавшейся звезды либо нейтронная звезда, либо черная дыра.

5. Нейтронные звезды и черные дыры. Нейтронные звезды были предсказаны в начале 30-х гг. XX в. советским физиком Л. Д. Ландау, астрономами В. Бааде и Ф. Цвикки, которые предположили, что нейтронные звезды могут образовываться в результате взрыва сверхновой. В 1967 г. были открыты пульсары, которые к 1977 г. были окончательно отождествлены с нейтронными звездами.

Плотность вещества в нейтронной звезде сравнима с плотностью вещества в атомном ядре: она достигает 10^{15}—10^{18} кг/м^3. При таких плотностях самостоятельное существование электронов и протонов невозможно, и вещество звезды состоит практически из одних нейтронов.

Радиусы нейтронных звезд, как и радиусы белых карликов, уменьшаются при увеличении массы. Так, нейтронная звезда массой 1,4 $M_\odot$ (минимальная масса нейтронной звезды) имеет радиус 100—200 км, а при массе 2,5 $M_\odot$ (максимальная масса) — всего 10—12 км. Схематический разрез нейтронной звезды показан на рисунке 86. Наружные слои звезды (см. рис. 86, III) состоят из железа, образующего твердую кору. На глубине примерно 1 км начинается твердая кора из железа с примесью нейтронов (см. рис. 86), которая переходит в жидкое сверхтекучее и сверхпроводящее ядро (см. рис. 86, I). При массах, близких к предельным (2,5—2,7 $M_\odot$), в центральных областях нейтронной звезды появляются более тяжелые элементарные частицы (гипероны).

Если масса остатка сверхновой (т. е. то, что остается после сброса оболочки) больше 1,4 $M_\odot$, но меньше 2,5 $M_\odot$, то сжатие его продолжается и после взрыва до тех пор, пока плотность не достигнет ядерных значений. Это приведет к тому, что электроны будут «вдавлены» в ядра, и образуется вещество, состоящее из одних нейтронов. Возникает нейтронная звезда (см. § 27). Но при большей массе остатка существование нейтронной звезды невозможно, так как давление нейтронного газа уже не может скомпенсировать силы тяготения, и образуется черная дыра.

Черная дыра — объект, предсказанный общей теорией относительности. Если вторая космическая скорость на поверхности звезды достигает скорости света, то ничто, даже свет, не может покинуть такой объект. Это и есть черная дыра. Радиус черной дыры ($r_д$) определяется из условия, что вторая космическая скорость равна скорости света:

$$v^2 = GM/r = c^2 \Rightarrow r_g = \frac{GM}{c^2} = 3\frac{M}{M_\odot}\text{ км}$$

(один из немногих случаев, когда результат, полученный в ОТО, совпадает с результатом ньютоновской механики).

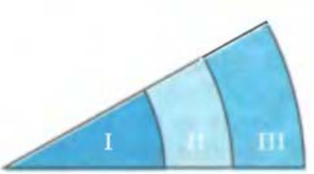


Рис. 86. Разрез нейтронной звезды.

В настоящее время установлено, что рентгеновский источник Лебедь X-1 представляет собой двойную звезду, невидимый компонент которой и является черной дырой. Гигантские черные дыры обнаружены и в центрах некоторых галактик, в частности и в нашей.

6. Особенности эволюции тесных двойных звезд. В последние годы особое внимание уделяется проблемам эволюции звезд, входящих в тесные двойные системы, поскольку бо́льшая часть звезд входит в двойные и кратные системы. Причем такие интересные объекты, как новые звезды, рентгеновские источники, черные дыры, всегда оказываются тесными двойными. Гравитационное и электростатическое поля описываются одними и теми же формулами (законами обратных квадратов: Кулона для электростатического поля и Ньютона для гравитационного поля). Поэтому и для гравитационного поля можно ввести понятие потенциала:

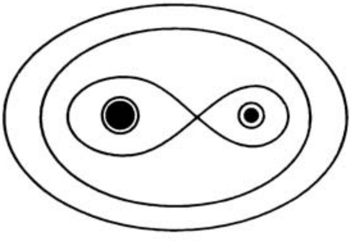


Рис. 87. Эквипотенциальные поверхности для систем двойных звезд.

$$V = E_{\text{пот}}/m.$$

Работа, совершаемая при переходе из одной точки поля в другую, определяется разностью потенциалов. Поэтому по эквипотенциальной поверхности (на которой потенциал имеет постоянное значение V=const) любое тело перемещается без совершения работы; это, в частности, означает, что поверхность звезды есть эквипотенциальная поверхность. (Если вдоль поверхности потенциал непостоянен, то вещество начинает течь к месту, где потенциал меньше.) На рисунке 87 показаны формы эквипотенциальных поверхностей для систем двойных звезд. Вблизи центров звезд эквипотенциальная поверхность распадается на две, каждая из которых окружает одну из звезд. Вдали единая эквипотенциальная поверхность окружает всю систему. Отделяет их поверхность с сечением, имеющим вид восьмерки с одной общей для обеих звезд точкой. Эта поверхность называется поверхностью Роша, общая для двух граничных поверхностей точка — точкой Лагранжа, а полость, ограниченная поверхностью Роша и окружающая звезду, — полостью Роша этой звезды.

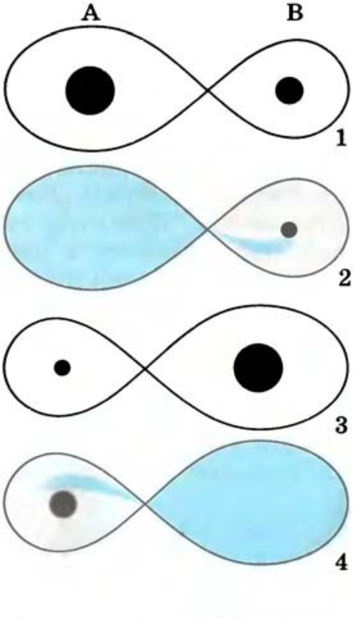


Рис. 88. Эволюция тесной двойной системы.

Компоненты новообразовавшейся двойной системы не заполняют полость Роша. В процессе эволюции звезда с большой массой эволюционирует быстрее и, переходя на стадию красного гиганта, заполняет свою полость Роша (рис. 88). Через точку Лагранжа газ из ее атмосферы перетекает в полость Роша второй звезды. Часть газа растекается по внешней эквипотенциальной поверхности, образуя общую оболочку звезд.

Потеряв бóльшую часть своей массы, звезда в зависимости от оставшейся массы превращается в белый карлик (если осталось меньше 1,4 $M_{\odot}$), нейтронную звезду (меньше 2,5 $M_{\odot}$) или черную дыру (при большей массе). Во всех случаях масса звезды *B* становится больше массы остатка звезды *A*.

В процессе изменения масс изменяется и расстояние между звездами. Оно оказывается минимальным, когда массы звезд сравниваются. В конце этого этапа эволюции расстояние между компонентами системы меньше первоначального, если нет потери массы из системы.

Увеличив свою массу, звезда *B* ускоряет эволюцию и в скором времени заполняет свою полость Роша (рис. 89). Снова начинается перетекание вещества (стадия вторичного обмена), теперь уже на звезду *A*, которая превратилась в компактный объект (белый карлик или черную дыру).

Газ не может сразу упасть на звезду, он образует вращающийся диск в плоскости орбиты двойной звезды. Скорость вращения на разных расстояниях от компактной звезды соответствует первой космической. Это означает, что она весьма велика; так, даже у нейтронной звезды она сравнима со скоростью света. Внутреннее трение разогревает диск до температуры порядка миллиона кельвин. Газ начинает светиться в рентгеновском диапазоне. Внутреннее трение передает момент вращения внешним слоям диска, и газ опускается на компактную звезду. При этом газ выделяет огромную энергию, которая высвечивается в рентгеновском диапазоне. На небе появляется рентгеновский источник.

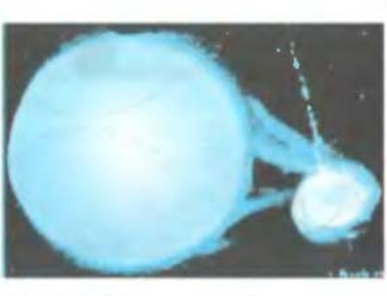


Рис. 89. Модель новой, пульсара, рентгеновского источника.

Если на стадии первичного обмена образовался белый карлик, то выпавшее на него вещество образует оболочку, богатую водородом. На нижней ее поверхности постепенно увеличивается температура, начинаются ядерные реакции с водородом, повышение температуры приводит к началу реакции с гелием и к взрыву, который мы наблюдаем как новую звезду (см. § 25). При взрыве оболочка срывается и снова начинает накапливаться за счет перетекания массы со звезды *B*. Окончательно образуется двойная звезда, состоящая из двух белых карликов.

Если в начале образуется нейтронная звезда, то возникает пульсар, а если черная дыра — то рентгеновский источник, характеристики которых зависят от массы остатка и темпа потери массы звездой *B*. Модели явления принципиально не различаются. Общая модель представлена на рисунке 89.

§ 34. ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

1. Образование галактик. Вернемся теперь к рассмотрению эволюции галактик.

Галактика образуется как огромный газовый шар, диаметр которого лишь незначительно превышает диаметр будущей галактики. Движения газа в нем хаотические, т. е. облака газа заполняют весь объем шара, двигаясь главным образом в радиальных направлениях. Весь шар вращается как целое. Сразу после возникновения протогалактики в ней начинается бурный процесс звездообразования, причем в основном образуются звезды большой массы. Быстро эволюционируя, они взрываются как сверхновые и обогащают межзвездную среду тяжелыми элементами.

На протяжении всего времени эволюции в галактике идет процесс обогащения межзвездного газа элементами тяжелее гелия. Различия химического состава, точнее доля тяжелых элементов, позволяют определить последовательность появления различных групп звезд (населений) в галактике.

2. Эволюция галактик. Итак, на первой стадии существования галактики в ней образуются первые звезда и газовые облака. Дальнейшая «судьба» галактики зависит от ее массы и вращения. Галактика малой массы, как правило, не формирует ясно видимой структуры. Процесс звездообразования в ней сильно затянут, о чем свидетельствует большое количество молодых голубых звезд. Образовавшиеся в галактике звезды сохраняют движение тех газовых облаков, в которых они образовались, так как столкновения и близкие сближения звезд очень редки. Поэтому если галактика изначально вращалась медленно, то звезды сохраняют хаотические движения главным образом в радиальных направлениях. Газовые же облака часто сталкиваются между собой. Их хаотические скорости гасятся, и газ смещается к центру галактики.

Вид галактики, определяемый звездами, будет мало отличаться от шара с сильной концентрацией звезд к центру, т. е. формируется эллиптическая галактика. Концентрирующийся к центру газ не только увеличивает концентрацию звезд к центру (процесс звездообразования не прекращается), но, по-видимому, приводит к образованию сверхмассивной черной дыры в ее центре. Взаимодействие черной дыры и газа, падающего к центру, определяет активность галактики.

В быстровращающейся галактике звезды первого поколения образуют сферическую составляющую (см. § 28). Хотя в такой галактике столкновения газовых облаков происходят не менее часто, чем в медленно вращающейся, газ не может сконцентрироваться к центру, ибо этому мешают центробежные силы. В результате газ будет концентрироваться в галактической плоскости.

Внешние возмущения приведут к тому, что в галактической плоскости возникнут волны плотности. Именно в них идет процесс звездообразования. Возникающие молодые массивные звезды и светящиеся под действием их излучения облака водорода образуют известный рисунок спиральной галактики.

§ 35. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Проблема объяснения возникновения Солнечной системы (теперь, когда обнаружено около 100 планетных систем, принято говорить не о Солнечной, а о планетной системе) начала решаться около 200 лет назад, когда два выдающихся ученых — философ И. Кант, математик и астроном П. Лаплас почти одновременно сформулировали первые научные гипотезы ее происхождения. Нужно сказать, что сами гипотезы и дискуссия вокруг них и других гипотез (например, Дж. Джинса) носили вполне умозрительный характер. Только в 50-х гг. XX в. было собрано достаточно данных, позволивших сформулировать современную гипотезу. Отметим, что всеобъемлющей гипотезы о происхождении планетной системы, которая бы детально объясняла такие вопросы, как различие химического и изотопного составов планет и их атмосфер, до настоящего времени не существует. В то же время современные представления о происхождении планетной системы достаточно уве-

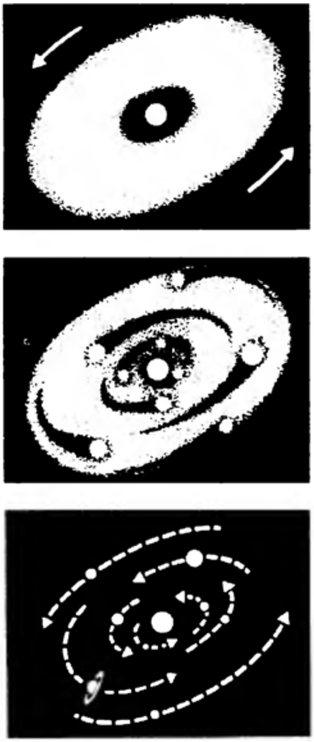


Рис. 90. Формирование Солнечной системы.

ренно трактуют такие вопросы, как разделение планет на две группы, основные различия в химическом составе, динамическую историю планетной системы.

У новообразовавшейся звезды — будущего Солнца — возник протопланетный газопылевой диск, который дал начало планетной системе (рис. 90). В развитии протопланетного диска большую роль играли процессы, происходящие на поверхности формирующегося Солнца. Молодая звезда нестабильна. На ее поверхности шли процессы, подобные процессам солнечной активности (см. § 23), но гораздо более интенсивные. Из ее недр выбрасывались сгустки и потоки замагниченной плазмы. Взаимодействуя с магнитным полем звезды и протопланетного диска, они ускоряли вращение диска и замедляли вращение будущего Солнца. При этом диск уплощался и его размеры увеличивались. Потоки ускоренных частиц вступали в реакции с атомами и обогащали вещество диска литием, бором, бериллием. Этих элементов в веществе планет намного больше, чем в веществе Солнца. Изменялся и изотопный состав будущего планетного вещества.

В результате усиливающегося излучения центральной звезды внутренние области диска прогревались, легкие элементы (водород, гелий) испарялись и покидали диск. В то же время внешние слои диска, заэкранированные внутренними слоями от нагрева, сохраняли значительную часть водорода и гелия. Так возникло различие химического состава планет группы Земли и группы Юпитера.

В сформировавшемся протопланетном диске начиналось слипание частиц. Слипание обеспечивается строением частиц. Они представляют собой углеродную, силикатную или железную пылинки, на которых нарастает снежная (вода, метан и др.) «шуба». Скорость обращения пылинок вокруг Солнца была достаточно велика (это кеплерова скорость, составляющая десятки километров в секунду), но относительные скорости очень малы, и при столкновениях частицы слипались в небольшие комочки.

Очень быстро решающую роль в увеличении комочков начинали играть силы притяжения. Это привело к тому, что скорость роста образующихся агрегатов пропорциональна их массе примерно в пятой степени. В результате на каждой орбите осталось одно крупное тело — будущая планета и, возможно, еще несколько тел значительно меньшей массы, которые стали ее спутниками.

Образование планет происходит очень быстро; так, для формирования Земли потребовалось около 100 000 000 лет. На самом последнем этапе на Землю и другие планеты падали уже не частицы, а тела астероидных размеров. Они способствовали уплотнению вещества, разогреву недр и появлению на их поверхностях следов в виде морей и кратеров. Этот период —

метеоритная бомбардировка — закончился около 3,5 млрд лет назад.

Расчеты, проведенные в последние годы, показали, что такой путь формирования планет достаточна хорошо обоснован.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. **Что такое Большой взрыв?**
2. **Как образуются звезды?**
3. **Как эволюционирует звезда малой массы?**
4. **Как эволюционирует звезда большой массы?**
5. **Что такое нейтронная звезда?**
6. **Что такое черная дыра?**
7. **Как эволюционирует тесная двойная звезда?**
8. **Как образуется планетная система?**

ОТВЕТЫ К КОНТРОЛЬНЫМ ВОПРОСАМ И ЗАДАЧАМ

Глава I

9. 4—2—1—3.
10. Вторая.
11. Нет.

Глава II

3. 54,5°; $12^{ч}48^{м}$.
8. 70,4°; 66,5°.
9. Ближайшее лунное затмение произойдет через 14,25 сут., частное.

Глава III

7. 1 260 000 км.
8. 0,74 км/с.
9. 8,5 км/с.
10. 25,2 пк.

Глава IV

10. 18 а.е.

Глава V

5. 4500 К.
6. 723 нм.
8. $2950:1:2{,}4\cdot10^{-4}$.
9. $\approx 2\cdot10^{7}$ К.
10. $\approx 6\cdot10^{7}$ лет.

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Программой предусмотрено проведение наблюдений (4 ч). К ним необходимо предварительно подготовиться: выбрать площадку, на которой можно будет разместить школьный телескоп; определить направление север—юг. Площадка должна быть по возможности защищена от внешних источников света и иметь открытый горизонт в южной части неба. Следует помнить, что наблюдения в полосе 10—15° от горизонта не проводятся. Школьный телескоп рекомендуется устанавливать заранее (до начала занятий). Для наблюдений можно также применять и другие оптические приборы: бинокли, подзорные трубы.

Используя «Школьный астрономический календарь», нужно наметить объекты, которые будут наблюдаться, оценить их расположение на видимой части небесной сферы.

Для вечерних наблюдений желательно выбрать ясные безлунные вечера.

Первое наблюдение можно проводить после изучения материала первых двух параграфов учебника. Но более реальный срок — конец октября — начало ноября, так как (после отмены летнего времени) темнеет в этот период года рано.

На первом занятии полезно ознакомиться с общим видом звездного неба, некоторыми созвездиями, найти ближайшую к нам галактику — туманность Андромеды, звездные скопления в Персее, двойные звезды (ε Лиры, Алькор и Мицар и др.), рассмотреть строение Млечного Пути и т. д.

Второе наблюдение следует провести после изучения материала о Луне.

Для наблюдений надо выбрать ясный вечер незадолго до или сразу после наступления первой четверти Луны. Луну можно наблюдать в бинокль, но потом нужно обязательно повторить наблюдение с помощью школьного телескопа с окуляром, дающим максимальное увеличение.

Следует обратить внимание на тени лунных гор, форму и число кратеров, светлые лучи у кратеров Тихо и Коперника, а также на то, что в ночной области Луны видны освещенные вершины гор.

Третье наблюдение рекомендуется посвятить изучению Солнца. Проводить его надо в ясный день после уроков.

Изображение Солнца проецируется на экран и зарисовывается наблюдателями. Отмечаются положения факелов и солнечных пятен. Для получения более ясных и четких изображений деталей применяется следующий прием: в то место, куда проецируется пятно (или факел), кладут листок бумаги и двигают его быстрым колебательным движением; тогда неравности бумаги сливаются, и изображение кажется более четким.

Особое внимание следует обратить на потемнение к краю и границе диска Солнца.

Четвертое наблюдение полезно выполнить зимой, в январе—феврале. Объектами наблюдений служат планеты (в зависимости от условий видимости их можно наблюдать и в первый вечер). Следует обратить внимание на видимые диски планет. Если изображение хорошее, на диске Юпитера можно увидеть полосы, а у Сатурна — кольца.

Обязательно нужно увидеть (только при достаточно темном небе, т. е. при полном отсутствии Луны) туманность Ориона.

Желающие могут проводить более длительные наблюдения. Например, последить за движением планеты среди звезд, для чего нужно ежедневно или с интервалом в несколько дней отмечать положения планеты на звездной карте, или понаблюдать за изменением высоты Солнца тоже в течение длительного промежутка времени. Наконец, самые упорные и интересующиеся могут заняться наблюдениями за переменными звездами.

Хорошая инструкция для любительских наблюдений содержится в книге В. П. Цесевича «Что и как наблюдать на небе» (М.: Наука, 1984).

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫХ ВЕЛИЧИН, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В АСТРОНОМИИ

Видимый угловой диаметр Солнца и Луны	0,5°
Наклон эклиптики к экватору	23,5°
Средний радиус Земли	6370 км
Разность экваториального и полярного радиусов Земли	21 км
Продолжительность года	365 сут. 5 ч 49 мин
Продолжительность синодического месяца (промежуток между двумя одинаковыми лунными фазами)	29,5 сут.
Продолжительность звездного (сидерического) месяца (период обращения Луны вокруг Земли)	27,3 сут.
Масса Солнца по сравнению с массой Земли	330 000 масс Земли
Самый короткий период обращения планеты (Меркурия)	3 мес. 88 сут.
Самый долгий период обращения планеты (Плутона)	250 лет
Диаметр самой большой планеты (Юпитера)	11 диаметров Земли
Среднее расстояние Луны от Земли	380 000 км
Среднее расстояние Земли от Солнца, или одна астрономическая единица	149 500 000 км
Один парсек	206 265 а. е., или 3,26 св. года
Расстояние от Солнца до ближайшей планеты (Меркурия)	0,4 а. е.
Среднее расстояние от Солнца до самой далекой планеты (Плутона)	40 а. е.
Расстояние от Солнечной системы до ближайшей звезды (α Центавра)	4 св. года, или 1,3 пк, или 270 000 а. е.
Поперечник нашей звездной системы — Галактики	100 000 св. лет
Расстояние до ближайшей спиральной звездной системы — галактики в созвездии Андромеды	2 000 000 св. лет
Число звезд, видимых невооруженным глазом	около 6000
Диаметр Луны по сравнению с диаметром Земли	0,25 диаметра Земли
Диаметр Солнца по сравнению с диаметром Земли	109 диаметров Земли
Температура поверхности Солнца	6000 К

Средний период изменения числа солнечных пятен	11 лет
Температура звезд	от 3000 К (красные звезды) до 30 000 К (голубоватые звезды)
Возраст земной коры	около 5 млрд лет
Весеннее равноденствие	21 марта
Летнее солнцестояние	22 июня
Осеннее равноденствие	23 сентября
Зимнее солнцестояние	22 декабря

II. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Тела Солнечной системы	Звездный период обращения, годы	Среднее расстояние от Солнца		Масса, в массах Земли	Средняя плотность, 10^3 кг/м^3	Экваториальный диаметр		Звездный период вращения вокруг оси	Наклон экватора к плоскости орбиты	Число известных спутников планеты
		а. е.	млн км			в диаметрах Земли	км			
Меркурий	0,241	0,387	58	0,05	5,44	0,38	4880	58,65$^{\text{д}}$	30°	—
Венера*	0,615	0,723	108	0,82	5,24	0,95	12 100	243,0$^{\text{д}*}$	3°	—
Земля	1,00	1,00	150	1,00	5,52	1,00	12 756	23$^{\text{ч}}$56$^{\text{м}}$4$^{\text{с}}$	23°27′	1
Марс	1,881	1,524	228	0,11	3,95	0,53	6800	24$^{\text{ч}}$37$^{\text{м}}$23$^{\text{с}}$	25°12′	2
Юпитер	11,86	5,203	778	318	1,33	11,2	142 800	9$^{\text{ч}}$50$^{\text{м}}$	3°06′	16
Сатурн	29,46	9,539	1426	95,1	0,69	9,5	120 660	10$^{\text{ч}}$14$^{\text{м}}$	26°24′	17
Уран*	84,01	19,19	2869	14,6	1,26	3,9	50 800	24,4$^{\text{ч}}$	98°	14(?)
Нептун	164,7	30,07	4496	17,2	1,67	3,9	49 600	17,8$^{\text{ч}}$	29°	2
Плутон	248,9	39,65	5929	0,002—0,004	0,3(?)	0,45	1500	6,4$^{\text{д}}$	?	1
Солнце	—	—	—	333 000	1,4	109,1	1 392 000	25,4$^{\text{д}}$	7°15′	—

---

* Вращение обратное.

III. ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ТИПИЧНЫХ ЗВЕЗД

Название звезды	Масса, в массах Солнца	Светимость, в светимостях Солнца	Радиус, в радиусах Солнца	Температура, К	Плотность по отношению к плотности воды
Главная последовательность					
ξ Возничего	10,2	220	3,5	11 000	0,33
Вега	2,8	52	3,0	9500	0,14
Сириус А	2,1	22,4	2,0	9250	0,36
α Центавра	1,02	1,3	1,2	5730	0,80
70 Змееносца	0,8	0,51	0,89	4900	2,2
Крюгер 60	0,3	$7\cdot10^{-3}$	0,26	3000	20,72
Гиганты					
Капелла	3,3	220	23	5200	$4\cdot10^{-4}$
Арктур	4,2	130	26	4100	$3\cdot10^{-4}$
Альдебаран	5,0	160	45	3600	$5\cdot10^{-5}$
Сверхгиганты					
Ригель	40	$2\cdot10^{5}$	138	11 200	$2\cdot10^{-5}$
Антарес	18	$3\cdot10^{4}$	560	3300	$1{,}5\cdot10^{-7}$
Белые карлики					
40 Эридана	0,44	$3{,}5\cdot10^{24}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	10 000	$1{,}25\cdot10^{8}$
Сириус В	1	$2{,}7\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-2}$	8200	$1{,}75\cdot10^{6}$

IV. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ТИПИЧНЫХ ГАЛАКТИК

Название или номер по каталогу	Светимость, $L_\odot$	Масса, $M_\odot$
Квазары	10^{14}—10^{15}	?
Ярчайшие галактики скоплений	$3\cdot10^{11}$—$5\cdot10^{11}$	10^{13}
Дева А, Сомбреро	10^{11}	10^{12}
Туманность Андромеды	10^{10}	$3\cdot10^{11}$—$6\cdot10^{11}$
Магеллановы Облака	10^{9}	10^{10}

V. НАИБОЛЕЕ ИНТЕРЕСНЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, КОТОРЫЕ МОЖНО БУДЕТ НАБЛЮДАТЬ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В 2003—2010 гг.

Время, которое указано, — это мировое время (UT), т. е. время на гринвичском (нулевом) меридиане. Для определения времени в данном месте (T — время, которым мы пользуемся) приводятся формулы

$T=UT+N+1$ (в зимний период) или 2 (в летний период).

Многие астрономические явления начинаются в различных географических пунктах в разное время. В таких случаях приводится некоторый интервал. Первая цифра интервала относится к самому западному, вторая — к самому восточному пункту. Если интервал мал или не имеет существенного значения, то дается только время начала явления для Москвы.

Прохождение Венеры по диску Солнца

8 июня 2004 г. Начало в 5 ч 12 мин. Будет наблюдаться со всей территории России. Наблюдение начните за 1—2 мин.

Полные солнечные затмения

29 марта 2006 г. Начало в 9 ч 37 мин — 10 ч 45 мин (начало частной фазы). Полное затмение (около 11 ч 40 мин) будет наблюдаться с территорий Ставропольского края, Карачаево-Черкесии, Кабардино-Балкарии, Северной Осетии, Ингушетии, Дагестана, Астрахани, Алтая, Горно-Алтайска, Тывы (Кызыл).

18 июля 2007 г. Начало в 13 ч — 15 ч. Будет наблюдаться с территории европейской части России.

Полные лунные затмения

8—9 ноября 2003 г. Начало в 1 ч 06 мин, окончание в 1 ч 30 мин. Будет наблюдаться со всей территории России (кроме Дальнего Востока).

4 мая 2004 г. Начало в 19 ч 52 мин, окончание в 21 ч 08 мин. Будет наблюдаться со всей территории России (кроме Дальнего Востока и Восточной Сибири).

28 октября 2004 г. Начало в 2 ч 23 мин, окончание в 3 ч 44 мин. Будет наблюдаться с территории европейской части России и Западной Сибири.

3 марта 2007 г. Начало в 22 ч 43 мин, окончание в 23 ч 57 мин. Будет наблюдаться со всей территории России (кроме северо-востока).

21 февраля 2008 г. Начало в 3 ч 00 мин. Будет наблюдаться с европейской части России.

16 августа 2008 г. Начало в 19 ч 05 мин. Будет наблюдаться со всей территории России.

Покрытия Луной Венеры

21 мая 2004 г. Начало в 11 ч 50 мин — 13 ч 07 мин. Будет наблюдаться с территории европейской части России и Западной Сибири.

18 июля 2007 г. Начало в 13 ч — 15 ч. Будет наблюдаться с территории европейской части России.

Покрытия Луной Марса

9 сентября 2003 г. Начало — после восхода Луны. Будет наблюдаться с территории Бурятии, Читинской и Амурской областей.

12 декабря 2005 г. Начало в 3 ч 48 мин (Камчатка) — 4 ч 21 мин (Тикси). Будет наблюдаться со всей территории России.

27 июля 2006 г. Начало в 17 ч 20 мин — 17 ч 53 мин. Будет наблюдаться с территории европейской части России.

24 декабря 2007 г. Начало в 2 ч 11 мин — 3 ч 40 мин. Будет наблюдаться со всей территории России.

Покрытия Луной Сатурна

2007 г. — произойдет серия покрытий. 7 января начало в 17 ч 40 мин — 19 ч 13 мин (в зависимости от места наблюдения), 2—3 февраля начало около 0 ч, 2 марта начало в 2 ч — 3 ч, 22 мая начало около 19 ч 30 мин, 18 июня начало около 15 ч. Это очень красивое явление, если наблюдать его хотя бы в школьный телескоп.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Астероиды 15, 67, 84
Астрономическая единица 19
Астрономия 3
— астрометрия 11, 24
— астрофизика 22
— небесная механика 12, 20, 48

Барретспирали. См. галактики
— пересеченные 137
Белый карлик 126

Венера
— атмосфера 75
— поверхность 75
— прохождение по диску Солнца 16
Вертикальная линия 26
Возмущенное движение 52
Время 37—40
Вселенная
— возникновение 146
— модель Ньютона 141
— модель Фридмана 144
— однородность 141
— эволюция 147
— ячеистая структура 139
Высота полюса над горизонтом 28

Галактика 15, 127
— вращение 126
— гигантские молекулярные облака 132
— корона 130
— межзвездная среда 131
— облака
— — газовые 132
— —газопылевые 132
— спиральная структура 134
— ядро 128
Галактики
— активные 139
— неправильные 137
— определение расстояний 135
— пересеченные 137
— радиогалактики 139
— спиральные 137
— формирование 148, 157
— эволюция 158
— эллиптические 137
Год
— високосный 42
— драконический 47
— календарный 42
— тропический 42
Годичное движение Солнца 36
Горизонт математический 27

Диаграмма Герцшпрунга—Ресселла 111

Задача двух тел 49
— полная энергия 57
— потенциальная энергия 58
Закон
— Вина 93
— Кеплера 10, 49, 60
— Стефана—Больцмана 93
— Хаббла 136
Затмение
— Луны 45
— периодичность 47
— Солнца 45
— условия наступления 46
Звездная величина 6, 7
Звезды
— видимые 3
— гравитационное сжатие 121
— двойные 15,112
— запас энергии в звезде 120
— затменно-переменные 114
— кратные 15, 112
— массы 112
— модели 123—127
— название 5
— невосходящие 31
— незаходящие 31
— нейтронные 153
— новые 117
— определение химического состава 110
— радиусы 110
— сверхновые 118
— светимость 109
— спектры 110
— температура 110

— термоядерные источники энергии 122
— устойчивость 123
— физические переменные 115
— физические условия в центре 119
— формирование 149
— характеристики 91
— цефиды 116
— эволюция
— — большой массы 151
— — двойных 155
— — начальная стадия 150
— — малой массы 150
Зенит 26

Излучение
— синхротронное 133
— тепловое 92
Интеграл энергии 60
Ио 83
Искусственные спутники Земли 60

Календарь 42
Карты неба 4, 32
Каталог 5, 32
Квазар 140
Кометы
— происхождение 68, 82
— строение 88
— эволюция 89
Красное смещение 136
Критическая плотность 145
Кульминация 30
— верхняя 30
— нижняя 30

Луна 70
— видимое движение 43
— поверхность 71
— фазы 44
Лучевая скорость 34
Лучистый перенос 96

Марс 77
— атмосфера 76
— спутники 80
Межпланетные перелеты 63
Меркурий 73
— атмосфера 74
— гипотеза о происхождении 66
— движение 73
— поверхность 73
Месяц
— драконический 47
— сидерический 44
— синодический 43, 44
Метеорит 87
Метеорные тела 68, 86
Метеоры 86
Микролинзирование 130

Небесная сфера 3, 24
— вращение 29
— основные точки 25
— построение 25
Небесный меридиан 25
Небесный экватор 25
Невидимые спутники звезд 53
Нептун 21, 52

Облако Оорта 67
Общая теория относительности 145
Определение масс небесных тел 50
Оптическая глубина 93
Оптическая толщина См. оптическая глубина
Ось мира 25

Парадокс
— гравиметрический 142
— фотометрический 142
Параллакс 16
— годичный 19
— горизонтальный 16
Парниковый эффект 75
Парсек 20
Перенос энергии
— излучение 96
— конвекция 95
— теплопроводность 94
Планетные конфигурации 16
Планеты-гиганты
— атмосфера 81
— внутреннее строение 83
— кольца 83
Плоскость
— горизонтальная 26

— меридиана 26
Поверхность Роша 155
Поглощение излучения 93
Полость Роша 155
Полюс 27
Постоянная Хаббла 137
Пояса астероидов 67
Прецессия 32, 53
Приливные
— силы 56
— ускорения 55
Приливы 54
Принцип вмороженности 105
Пульсар 118, 155

Реголит 72
Реликтовое излучение 148
Рентгеновский источник 156
Решение Лагранжа 51

Сарос 47
Светимость 91
Световой год 20
Система координат 26
— горизонтальная 27
— экваториальная 28
Система мира
— Коперника 9
— Птолемея 8
Сверхскопления 138
Скопления галактик 138
Скопления звездные 131
— рассеянные 131
— шаровые 131
Скрытая масса 130
Собственное движение 33
Созвездия 4
Солнечная система
— происхождение 65, 158
— строение 65
Солнце
— активные образования 104
— — вспышки 107
— — протуберанцы 104
— — пятна 106
— — факелы 106
— — флоккулы 106
— грануляции 102
— корона 102
— определение химического состава 99
— распределение энергии в спектре 94, 99
— солнечный ветер 68
— строение оболочек 104
— температура 99
— формирование видимого спектра 97, 98
— характеристики 91
— хромосфера 101, 102
— цикличность активности 108
— число Вольфа 109
Сумерки 35
Сутки 37
— звездные 37
— солнечные 38
— — истинные 38
— — средние 39
Суточная параллель 35
Суточное движение 35

Телескопы 13, 15
Теорема вириала 59, 121
Туманности 15
— внегалактические. См. галактики
— диффузные 15
— Крабовидная 118
— планетарные 134
— светлые 133
— темные 132

Узел лунной орбиты 43
Уравнение теплопроводности 94
Уран 15

Фобос. См. Марс, спутники
Фотосфера 97

Черная дыра 154, 155

Эклиптика 36
Эра 42
Эффект Доплера 34

Юпитер
— атмосфера 81
— Большое Красное Пятно 81
— спутники 83

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. **Введение** 3

§ 1. Начальный период развития астрономии . . . . —
§ 2. Становление современной астрономии 12
Контрольные вопросы и задачи 23

Глава II. **Видимый мир** 24

§ 3. Небесная сфера и координаты на ней . . . . —
§ 4. Изменение координат со временем 32
§ 5. Движение Солнца среди звезд. Эклиптика 35
§ 6. Измерение времени 37
§ 7. Движение Луны. Затмения 43
Контрольные вопросы и задачи 48

Глава III. **Мир тяготения** 48

§ 8. Задача двух тел. Законы Кеплера . . . . —
§ 9. Возмущенное движение. Возмущающие силы. Приливы . . 51
§ 10. Динамика космического полета 57
Контрольные вопросы и задачи 65

Глава IV. **Мир планет** 65

§ 11. Строение Солнечной системы . . . . —
§ 12. Физические характеристики планет группы Земли 68
§ 13. Физическое строение планет группы Юпитера 69
§ 14. Луна 70
§ 15. Меркурий 73
§ 16. Венера 75
§ 17. Марс 78
§ 18. Планеты-гиганты 81
§ 19. Астероиды и метеориты 84
§ 20. Кометы 88
Контрольные вопросы и задачи 90

Глава V. **Мир звезд** 91

§ 21. Солнце . . . . —
§ 22. Строение солнечных оболочек 101
§ 23. Солнечная активность и ее земные проявления 104
§ 24. Звезды 109
§ 25. Двойные и переменные звезды 112
§ 26. Физические условия внутри звезд. Источники энергии звезд 119
§ 27. Модели звезд 123
Контрольные вопросы и задачи 127

Глава VI. **Мир галактик** 127

§ 28. Наша Галактика . . . . —
§ 29. Объекты нашей Галактики 131
§ 30. Галактики 135
Контрольные вопросы и задачи 141

Глава VII. **Развивающийся мир** 141

§ 31. Большая Вселенная . . . . —
§ 32. От Большого взрыва до образования галактик 146
§ 33. Эволюция звезд 149
§ 34. Эволюция галактик 157
§ 35. Происхождение Солнечной системы 158
Контрольные вопросы и задачи 160

Ответы к контрольным вопросам и задачам 161
Астрономические наблюдения 162
Приложения 164
Предметный указатель 170

Учебное издание

Порфирьев Владимир Владимирович

АСТРОНОМИЯ

Учебник для 11 класса
общеобразовательных учреждений

Зав. редакцией *Г. Н. Федина*
Редактор *В. В. Жумаев*
Младший редактор *Л. А. Крикунова*
Художники *С. Барков, О. Нихамовская*
Художественный редактор *В. Н. Алексеев*
Технические редакторы *Е. Н. Зелянина, С. Н. Терехова*
Корректоры *Н. В. Бурдина, О. В. Крупенко, И. Н. Панкова*

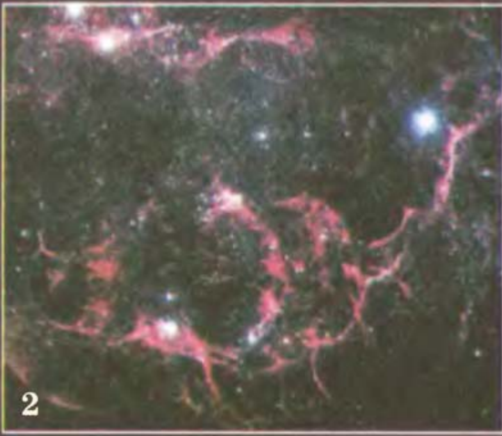
Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Сдано в набор 21.01.03. Подписано в печать 17.06.03. Формат $60\times90\ {}^{1}/_{16}$. Бумага писчая № 1. Гарнитура Школьная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 11+0,5 вкл.+0,375 форз. Усл. кр.-отт. 26. Уч.-изд. л. 10,29+0,46 вкл.+0,65 форз. Тираж 10 000 экз. Заказ № 5835 (Кр+Гз).

Федеральное государственное унитарное предприятие ордена Трудового Красного Знамени «Издательство «Просвещение» Министерства Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. 127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

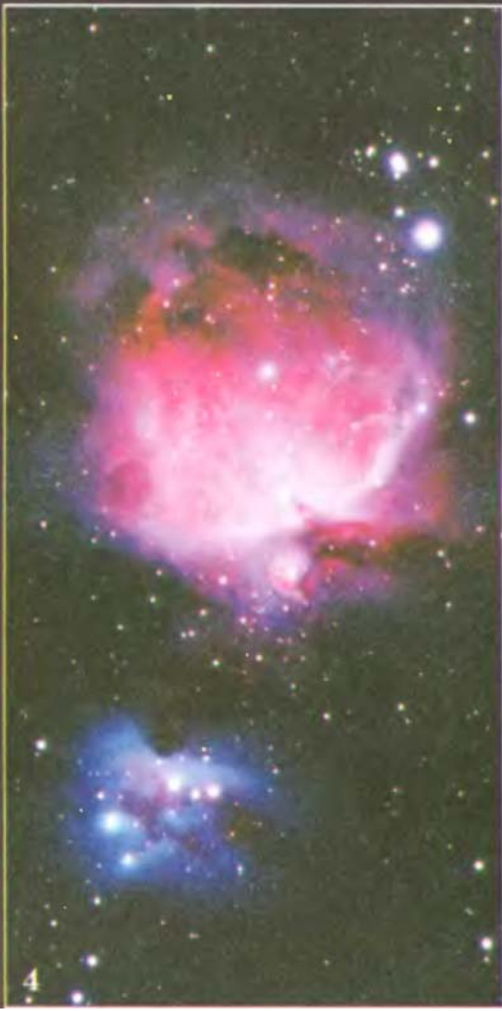
Федеральное государственное унитарное предприятие Смоленский полиграфический комбинат Министерства Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. 214020, г. Смоленск, ул. Смольянинова, 1.

ТУМАННОСТИ

1

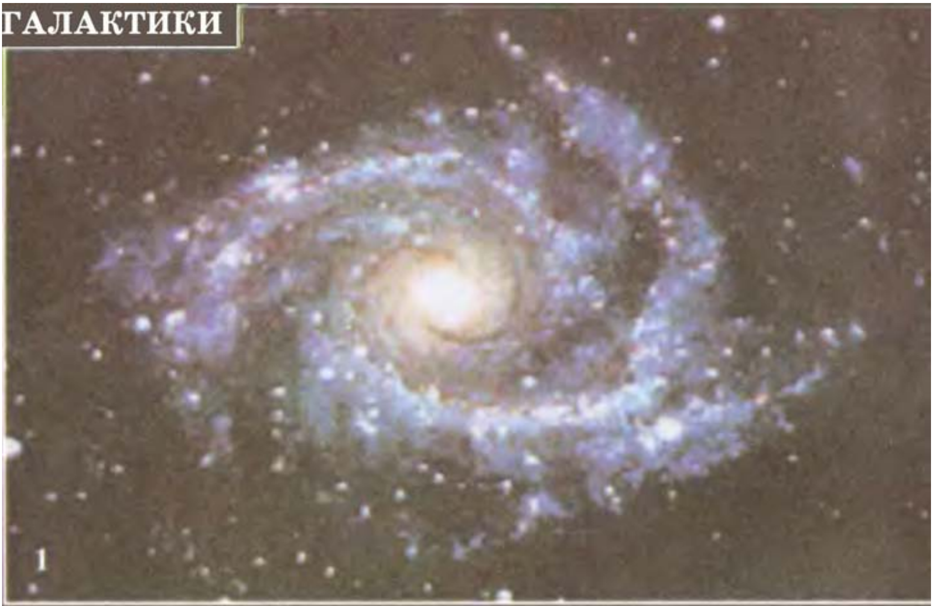

2

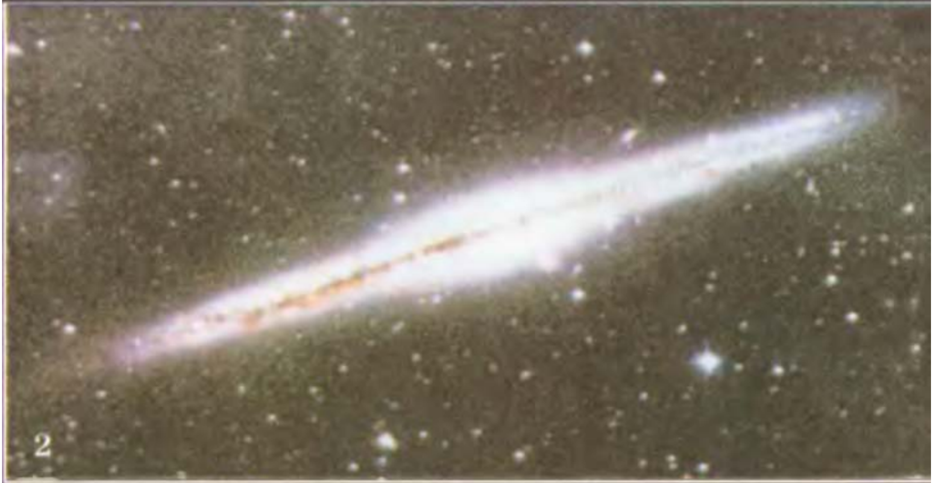
3

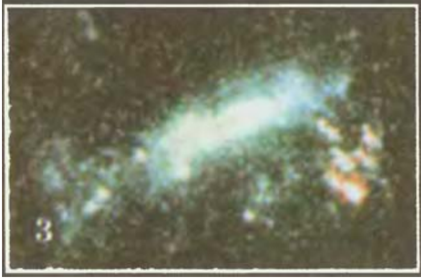

4

1. Крабовидная туманность.
2. Волокнистая туманность.
3. Планетарная туманность
   в созвездии Лиры .
4. Гигантский газопылевой комплекс
   туманность Ориона.

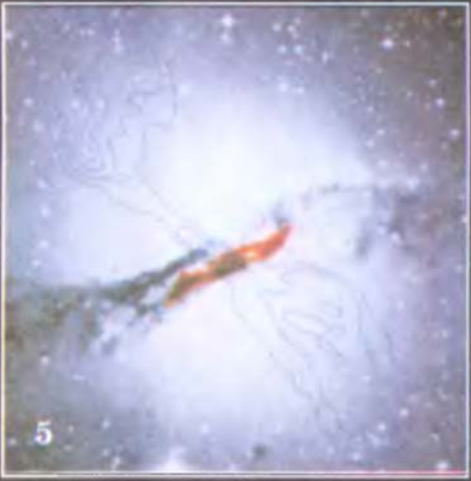
ГАЛАКТИКИ







1. Спиральная галактика.
2. Спиральная галактика (вид ребром).
3. Неправильная галактика.
Большое Магелланово облако.



4. Барретспираль.
5. Радиогалактика Центавр A
(тонкие линии очерчивают область
радиоизлучения).
6. Группа галактик Квинтет Стефана.

Школьные учебники СССР

SHEBA.SPB.RU/SHKOLA